VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ



# EXPOSITION DU SYSTÈME DU MONDE

PAR M. LE MARQUIS

DE LAPLACE



ПЬЕР СИМОН ЛАПЛАС

# ИЗЛОЖЕНИЕ СИСТЕМЫ МИРА

ПЕРЕВОД

В. М. ВАСИЛЬЕВА

ИЗДАНИЕ ПОДГОТОВИЛИ

В. М. ВАСИЛЬЕВ и А. А. МИХАЙЛОВ





ЛЕНИНГРАД
«НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1982

СЕРИЯ «КЛАССИКИ НАУКИ»

Серия основана академиком *С. И. Вавиловым*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*Б. Н. Делоне*, *И. Е. Дзялошинский* (заместитель председателя), *А. Ю. Ишлинский*, *П. Л. Капица* (председатель), *С. П. Капица*, *Б. М. Кедров*, *И. Л. Кнунянц*, *А. Н. Колмогоров*, *С. Р. Микулинский*, *А. А. Михайлов*, *Л. С. Полак*, *Я. А. Смородинский*, *В. А. Энгельгардт*, *А. Л. Яншин*

*УДК 52*

**Изложение системы мира.** **Лаплас П. С.** Л., «Наука», 1982, 376 с.

В этой книге П. С. Лаплас — знаменитый французский математик и астроном (1749—1827) в популярной форме излагает содержание своего фундаментального труда — пятитомного «Трактата по небесной механике» и на основе закона всемирного тяготения объясняет все наблюдаемые движения планет и спутников солнечной системы. В конце он приводит свою космогоническую гипотезу и дает очерк истории астрономии.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся историей науки, в частности астрономии и физики.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

академик А. А. Михайлов

Л $\frac{1705010000\text{-}578}{055(02)\text{-}82}$ 84-82, кн. 2

© Издательство «Наука», 1982 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ


От составителей . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 7
Уведомление к шестому изданию . . . . . . . . . . . . . . 8
Изложение системы мира . . . . . . . . . . . . . . . . . 9

**Книга первая. О видимых движениях небесных тел** . . . . . . . . . 10

Глава I. О суточном движении неба . . . . . . . . . . . . 10
Глава II. О Солнце и его движениях . . . . . . . . . . . . 11
Глава III. О времени и его измерении . . . . . . . . . . . 18
Глава IV. О движениях Луны, ее фазах и затмениях . . . . . . 22
Глава V. О планетах, особенно о Меркурии и Венере . . . . . 29
Глава VI. О Марсе . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 32
Глава VII. О Юпитере и его спутниках . . . . . . . . . . . 33
Глава VIII. О Сатурне, о его спутниках и его кольце . . . . . 36
Глава IX. Об Уране и его спутниках . . . . . . . . . . . . 38
Глава X. О телескопических планетах Церере, Палладе, Юноне и Весте . . . 39
Глава XI. О движении планет вокруг Солнца . . . . . . . . 39
Глава XII. О кометах . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 42
Глава XIII. О звездах и их движениях . . . . . . . . . . . 42
Глава XIV. О фигуре Земли, об изменении силы тяжести на ее поверхности и о десятичной системе мер и весов . . . . . . . . . . . . . 46
Глава XV. О морских приливах и отливах, или о суточных вариациях фигуры моря . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 62
Глава XVI. О земной атмосфере и астрономической рефракции . . . . . 66

**Книга вторая. Об истинных движениях небесных тел** . . . . . . . . 77

Глава I. О вращательном движении Земли . . . . . . . . . . 77
Глава II. О движении Земли вокруг Солнца . . . . . . . . . 79
Глава III. О кажущихся явлениях, обусловленных движениями Земли . . . 83
Глава IV. О законах движения планет вокруг Солнца и о фигуре их орбит 86
Глава V. О форме кометных орбит и законах движения комет вокруг Солнца 90
Глава VI. О законах движения спутников вокруг их планет . . . . . . . 95

**Книга третья. О законах движения** . . . . . . . . . . . . . 101

Глава I. О силах, их сложении и о равновесии материальной точки . . . . 101
Глава II. О движении материальной точки . . . . . . . . . 103
Глава III. О равновесии системы тел . . . . . . . . . . . 114
Глава IV. О равновесии жидкостей и газов . . . . . . . . . 121
Глава V. О движении системы тел . . . . . . . . . . . . . 124

**Книга четвертая. О теории всемирного тяготения** . . . . . . . . . 133

Глава I. О принципе всемирного тяготения . . . . . . . . . 134
Глава II. О возмущениях эллиптического движения планет . . . . . . 141
Глава III. О массах планет и о силе тяжести на их поверхности . . . . . 148
Глава IV. О возмущениях эллиптического движения комет . . . . . . 152
Глава V. О возмущениях движения Луны . . . . . . . . . . 155
Глава VI. О возмущениях спутников Юпитера . . . . . . . . 167
Глава VII. О спутниках Сатурна и Урана . . . . . . . . . . 174
Глава VIII. О фигуре Земли и планет и о законе тяжести на их поверхности 174
Глава IX. О фигуре кольца Сатурна . . . . . . . . . . . . 190

Глава X. Об атмосферах небесных тел . . . . . . . . . . . . . . . . 191
Глава XI. О приливах и отливах моря . . . . . . . . . . . . . . . . 193
Глава XII. Об устойчивости равновесия морей . . . . . . . . . . . . 207
Глава XIII. О колебаниях атмосферы . . . . . . . . . . . . . . . . . 207
Глава XIV. О предварении равноденствий и о нутации земной оси . . . . . 211
Глава XV. О либрации Луны . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 217
Глава XVI. О собственных движениях звезд . . . . . . . . . . . . . . 220
Глава XVII. Размышления о законе всемирного тяготения . . . . . . . . 221
Глава XVIII. О молекулярном притяжении . . . . . . . . . . . . . . . 226

**Книга пятая. Краткий очерк истории астрономии** . . . . . . . . . . . 257

Глава I. О древней астрономии до основания Александрийской школы . . . 258
Глава II. Об астрономии с основания Александрийской школы до арабов . . 267
Глава III. Об астрономии с Птолемея до ее возрождения в Европе . . . . . 276
Глава IV. Об астрономии в современной Европе . . . . . . . . . . . . 281
Глава V. Об открытии всемирного тяготения . . . . . . . . . . . . . . 296
Глава VI. Размышления о системе мира и о будущих успехах астрономии 309

**Примечания** 319

Примечание I . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 319
Примечание II . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 320
Примечание III . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 321
Примечание IV . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 321
Примечание V . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 323
Примечание VI . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 323
Примечание VII и последнее . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 324

**Приложения** 332

Комментарии (*А. А. Михайлов*) . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 332
Имена, встречающиеся в «Изложении системы мира» П. С. Лапласа (*В. М. Васильев*) . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 340
Лаплас и его вклад в развитие астрономии (*В. М. Васильев*). . . . . . 350
Астрономические постоянные и элементы орбит планет и их спутников (*В. К. Абалакин*) . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 369
Кант о переменности суточного вращения Земли (*В. К. Абалакин*) . . . . . 372
Литература . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 374

# ОТ СОСТАВИТЕЛЕЙ

В уведомлении к шестому изданию «Изложения системы мира» указывается, что в этой работе для измерения углов и времени Лаплас применял десятичные единицы. Так как они не совпадают с действующими в настоящее время стандартами, после чисел, приводимых Лапласом, в прямых скобках даются их значения в современных единицах измерения. В таблице приводится соотношение этих единиц.

| Десятичные единицы | | Шестидесятеричные единицы | | |
|---|---|---|---|---|
| наименования | обозначения | обозначения | | |
| 100 градов | $100^g$ | $90^\circ$ | $5400'$ | $32400''$ |
| 1 град | $1^g$ | $0\overset{\circ}{.}9$ | $54'$ | $324''$ |
| 1 минута | $1^c$ | $0\overset{\circ}{.}009$ | $0\overset{\prime}{.}54$ | $32\overset{\prime\prime}{.}4$ |
| 1 секунда | $1^{cc}$ | $0\overset{\circ}{.}00009$ | $0\overset{\prime}{.}0054$ | $0\overset{\prime\prime}{.}324$ |
| 10 часов | 10 ч | $24^h$ | $1440^m$ | $86400^s$ |
| 1 час | 1 ч | $2\overset{h}{.}4$ | $144^m$ | $8640^s$ |
| 1 минута | 1 мин | $0\overset{h}{.}024$ | $1\overset{m}{.}44$ | $86\overset{s}{.}4$ |
| 1 секунда | 1 с | $0\overset{h}{.}00024$ | $0\overset{m}{.}0144$ | $0\overset{s}{.}864$ |

Во многих случаях Лаплас дает численные значения с неоправданно избыточным числом десятичных знаков. Чтобы сохранить стиль его изложения, было решено не уменьшать приведенное им число знаков. По этой же причине не разделены на несколько предложений, как это делают иногда при переводах, некоторые очень длинные фразы Лапласа, не свойственные современному французскому литературному языку.

В своей работе Лаплас часто ссылается на многих ученых и философов всех времен. Так как, возможно, не все они известны широкому кругу читателей, было решено привести список их имен и некоторые, весьма краткие указания об их деятельности.

За время, протекшее после жизни и деятельности Лапласа, астрономия сделала огромные успехи и получила всестороннее развитие. Открылись новые астрономические обсерватории, построены мощные телескопы, позволившие обнаружить множество ранее не известных небесных объектов. Появились совершенно новые области астрономии — астрофизика, астрофотография, радиоастрономия, космическая астрономия и другие. Точность астрономических наблюдений несравненно возросла.

В комментариях к работе Лапласа нет никакой возможности даже кратко осветить все эти достижения. Поэтому пришлось ограничиться лишь помещением в конце книги любезно предоставленного заведующим отделом Астрономического ежегодника СССР В. К. Абалакиным перечня принятых в настоящее время астрономических постоянных и элементов орбит планет и их спутников. В случае необходимости это дает читателю возможность сравнить их с соответствующими величинами, приводимыми Лапласом.

# УВЕДОМЛЕНИЕ К ШЕСТОМУ ИЗДАНИЮ

Смерть отняла автора у науки, когда он был занят переизданием этой работы. Многие замечания, написанные его рукой, можно найти в этом новом издании, корректурные листы которого он исправлял еще в последние дни своей жизни. Однако эта работа продвигалась медленно.

Г-н Лаплас много раз в своем частном кругу выражал ту мысль, что, к сожалению, нельзя достаточно защитить ученых от исправления их работ после смерти. Он говорил, что такие исправления равносильны изменению оригинала часто в ущерб первоначальной мысли автора и всегда во вред истории науки. Это мнение мы скрупулезно учитывали, воспроизведя в этом шестом издании «Системы мира» точный текст предыдущего издания, внося лишь исправления, которые автор мог сделать сам. Однако три главы четвертой книги, которые он хотел исключить из пятого издания, снова помещены здесь, а именно: глава XII «Об устойчивости равновесия моря»; глава XVII «Размышления о законе всемирного тяготения» и, наконец, глава XVIII «О молекулярном притяжении». В предисловии к этому последнему изданию г-н Лаплас упомянул о намерении объединить основные результаты применения анализа к молекулярным воздействиям, отличным от всемирного тяготения, которые получили такое широкое развитие, что должны быть предметом специального труда, следующего за «Изложением системы мира».

Так как время не позволило ему выполнить эту работу, в новом издании было естественно восстановить эти главы в том виде, в котором они были в четвертом издании. Вот почему они снова образуют главы XII, XVII и XVIII четвертой книги. Мы думали, что это ни в какой мере не нарушает принцип самого автора, о котором выше шла речь, и что мы полезным и интересным для науки образом дополнили настоящую работу.

В этом издании, как и в предыдущем, прямой угол делится на десятичные доли, так же как и сутки, начало которых приурочено к полуночи. Линейные измерения отнесены к метру, а измерения температуры — к показаниям ртутного термометра, разделенного на 100°, от температуры тающего льда до температуры кипящей воды, находящейся под давлением, эквивалентным давлению столба ртути высотой в 0.76 м при нулевой температуре на параллели 50°.

# ИЗЛОЖЕНИЕ СИСТЕМЫ МИРА

Но для себя я о главном прошу: пусть милые Музы,
Коим священно служу, великой исполнен любовью,
Примут меня и пути мне покажут небесных созвездий.

Вергилий. Георгики, кн. II, 475—477.*

Из всех естественных наук астрономия представляет собой наиболее длинную цепь открытий. От первого взгляда на небо чрезвычайно далеко до того общего представления, которое в настоящее время охватывает прошлые и будущие состояния системы мира. Чтобы этого достичь, надо было наблюдать небесные светила в течение многих веков, распознать в их видимых движениях действительные движения Земли, подняться до законов движения планет, а от этих законов — к принципу всемирного тяготения; наконец, исходя из этого принципа, дать полное объяснение всех небесных явлений, вплоть до самых малых деталей. Вот что сделал человеческий ум в астрономии.

Изложение этих открытий и самого простого способа, позволившего им возникнуть и следовать одно за другим, имеет двойное преимущество: представить великую совокупность важных истин и правильный метод, которому надо следовать в изучении законов природы. Вот задача, которую я себе поставил в этой работе.

---

* Перевод С. Шервинского.

# Книга первая

# О ВИДИМЫХ ДВИЖЕНИЯХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

## Глава I

## О СУТОЧНОМ ДВИЖЕНИИ НЕБА

Если в ясную ночь в местности с открытым горизонтом внимательно следить за картиной неба, она представляется непрерывно изменяющейся. Звезды поднимаются или опускаются; некоторые из них начинают показываться на востоке, другие исчезают на западе. Многие, такие как Полярная звезда и звезды Большой Медведицы, никогда не достигают горизонта в наших широтах. При этих движениях взаимное положение всех звезд остается неизменным: они описывают окружности тем меньшие, чем они ближе к некоторой точке, которую принимают неподвижной. Таким образом, небо кажется вращающимся на двух неподвижных точках, названных по этой причине *полюсами мира*, и в этом движении увлекающим всю систему звезд. Полюс, возвышающийся над нашим горизонтом, называется *северным*, или *септентриональным*. Противоположный полюс, который воображают находящимся под горизонтом, называют *южным*, или *меридиональным*.

Сразу же возникает множество интересных вопросов, требующих разрешения. Что делается днем со светилами, которые мы видим в течение ночи? Откуда приходят те, что появляются над горизонтом? Куда уходят те, которые исчезают? Внимательное рассмотрение явлений дает простые ответы на эти вопросы. Утром свет звезд ослабевает, по мере того как разгорается заря; вечером, по мере сгущения сумерек, он становится ярче. Таким образом, мы перестаем видеть звезды не потому, что они перестают светиться, а потому, что их свет ослабляется более ярким светом зари и Солнца. Счастливое изобретение телескопа позволило нам проверить это объяснение, дав возможность видеть звезды даже в момент самого высокого положения Солнца. Те из них, которые достаточно близки к полюсу и никогда не достигают горизонта, видимы постоянно. Что касается звезд, появляющихся на востоке, чтобы исчезнуть на западе, то естественно полагать, что они продолжают описывать под горизонтом окружность, которую они описывали над ним, но что горизонт закрывает от нас ее нижнюю часть. Эта истина становится особенно наглядной при продвижении к северу: окружности, описываемые северными звездами, все более и более высвобождаются из-под горизонта, и, наконец, эти звезды перестают исчезать под ним, тогда как другие звезды, расположенные на юге, становятся совсем невидимыми. Перемещаясь к югу, мы наблюдаем обратное: звезды, которые постоянно находились над горизонтом, начинают последовательно восходить и заходить, и появляются другие звезды, ранее невидимые. Отсюда следует, что поверхность Земли не такова,

какой она нам кажется — в виде плоскости, на которую опирается небосвод. Это — иллюзия, которую первые наблюдатели не замедлили исправить путем рассуждений, аналогичных предыдущим. Они скоро обнаружили, что небо охватывает Землю со всех сторон и что звезды светятся непрерывно, описывая в течение суток каждая свою окружность. В дальнейшем мы увидим, что астрономия часто занимается исправлением подобных иллюзий и распознает реальные явления за их обманчивой видимостью.

Чтобы составить точное представление о движении небесных светил, воображают ось, проходящую через центр Земли и два полюса мира, вокруг которой вращается небесная сфера. Большой круг, перпендикулярный этой оси, называется *экватором.* Малые круги, описываемые звездами параллельно экватору вследствие суточного движения, называются *параллелями. Зенитом* наблюдателя является точка, в которой отвесная линия пересекает небесную сферу, а *надиром* — диаметрально противоположная точка. *Меридианом* называется большой круг, проходящий через зенит и полюсы. Он делит на две равные части дуги, описываемые звездами над горизонтом. Достигнув меридиана, они находятся на наибольшей или наименьшей высоте. Наконец, *горизонт* — это большой круг, перпендикулярный отвесной линии или параллельный поверхности стоячей воды в месте наблюдения.

Полюс занимает середину между наименьшей и наибольшей высотой незаходящих звезд, что дает легкий способ определения его высоты. Двигаясь прямо к полюсу, мы видим, как он поднимается почти в точности на величину, пропорциональную пройденному расстоянию. Следовательно, поверхность Земли выпуклая, и ее форма мало отличается от сферы. Выпуклость Земли особенно заметна на поверхности морей: мореплаватель, приближаясь к берегам, видит сперва самые высокие точки, а уже затем постепенно открываются более низкие части, скрывавшиеся выпуклостью Земли. Ею же объясняется то, что Солнце при своем восходе, золотит вершины гор прежде, чем осветить равнины.

## Глава II

## О СОЛНЦЕ И ЕГО ДВИЖЕНИЯХ

Все небесные светила участвуют в суточном движении небесной сферы, но некоторые имеют собственные движения, которые важно проследить, так как только они могут привести нас к истинному познанию системы мира. Подобно тому как для измерения удаленности предмета его наблюдают с двух разных точек, так и для раскрытия механизма природы ее надо рассматривать с различных точек зрения и наблюдать развитие ее законов в изменениях представляемой ею картины.

На Земле мы изменяем явления, ставя эксперименты; на небе мы тщательно изучаем те явления, которые доставляют нам небесные движения. Вопрошая таким образом природу и подвергая ее ответы анализу,

путем ряда правильно сделанных заключений мы можем подняться до ее основных явлений, из которых вытекают все частные факты. Наши усилия должны быть направлены на раскрытие этих основных явлений и на сведение их к наименьшему возможному числу, поскольку первопричина и сокровенная сущность природы вечно будут нам неизвестны.

Солнце имеет собственное движение, направленное в сторону, противоположную суточному движению. Это движение обнаруживается при рассмотрении картины ночного неба, картины, которая меняется и вновь повторяется с временами года. Звезды, расположенные на пути Солнца и заходящие немного позднее его, вскоре теряются в его свете и затем вновь появляются перед его восходом. Следовательно, это светило движется навстречу им — с запада на восток. Именно так долгое время наблюдали за его собственным движением, и теперь оно может быть с большой точностью определено путем ежедневных наблюдений меридианной высоты Солнца и определения времени, протекающего между его прохождением и прохождением звезд через меридиан. Эти наблюдения дают собственное движение Солнца в направлении меридиана и по параллели. Результирующая этих движений и есть истинное движение этого светила вокруг Земли. Таким путем было найдено, что Солнце движется по орбите, называемой *эклиптикой*, которая в начале 1801 г. была наклонена к экватору на 26.$^{g}$07315 [23.$^{\circ}$46584].

Наклонение эклиптики к экватору является причиной смены времен года. Когда Солнце в результате своего годичного движения достигает экватора, его суточное движение почти в точности проходит по экватору, и поскольку этот большой круг делится пополам всеми горизонтами, то на всей Земле день равен ночи. По этой причине точки пересечения экватора с эклиптикой были названы *точками равноденствия*. По мере того как Солнце движется от точки весеннего равноденствия по своей орбите, его меридианные высоты над нашим горизонтом все больше и больше возрастают; видимые дуги параллелей, которые оно ежедневно описывает, непрерывно увеличиваются, что приводит к возрастанию продолжительности дня до тех пор, пока Солнце не достигает своей наибольшей высоты. В это время день оказывается самым длинным в году, и поскольку около максимума меридианная высота Солнца меняется несущественно, Солнце, если рассматривать только его высоту, от которой зависит продолжительность дня, представляется неподвижным. Поэтому эта точка максимальной высоты Солнца названа точкой *летнего солнцестояния*. Параллель, которую Солнце описывает в это время, называется *летним тропиком*. Затем светило опускается к экватору, вновь пересекает его в точке *осеннего равноденствия* и, наконец, достигает своей наименьшей высоты во время *зимнего солнцестояния*. Параллель, описываемая Солнцем в это время, называется *зимним тропиком*, и день, который соответствует этому, — самый короткий в году. Достигнув этой точки, Солнце вновь поднимается к экватору и возвращается к точке весеннего равноденствия, чтобы снова начать такой же путь.

Таково постоянное движение Солнца и смена времен года. Весна — это промежуток между весенним равноденствием и летним солнцестоя-

нием; интервал времени от этого солнцестояния до осеннего равноденствия — лето; интервал от точки осеннего равноденствия до зимнего солнцестояния — осень; наконец, зима — это промежуток между зимним солнцестоянием и весенним равноденствием.

Поскольку присутствие Солнца над горизонтом является причиной тепла, может показаться, что летом температура должна быть такою же, как весной, и зимой — такой же, как осенью. Но температура не является мгновенным эффектом присутствия Солнца, а представляет результат его длительного воздействия. Дневная температура достигает максимума только после того, как это светило достигнет наибольшей высоты над горизонтом, годовая — лишь после летнего солнцестояния.

Климат имеет большие различия, которые мы проследим от экватора до полюсов. На экваторе горизонт делит на две равные части все параллели. Поэтому здесь день всегда равен ночи. Во время равноденствий в полдень Солнце поднимается до самого зенита. Во время солнцестояний меридианные высоты этого светила наименьшие и равны дополнению наклонности эклиптики к экватору; солнечные тени в эти периоды имеют противоположные направления, чего никогда не бывает в наших широтах, где в полдень они всегда направлены на север. Отсюда следует, что на экваторе, строго говоря, в каждом году бывает две зимы и два лета. То же имеет место во всех странах, где высота полюса меньше наклона эклиптики. Вне этих областей в году бывает только одна зима и одно лето, поскольку Солнце здесь никогда не поднимается до зенита; самый длинный день увеличивается и самый короткий уменьшается по мере приближения к полюсу, и если зенит удален от него лишь на угол, равный наклону эклиптики, Солнце не заходит во время летнего солнцестояния и не восходит во время зимнего. Еще ближе к полюсу время присутствия и отсутствия Солнца над горизонтом в периоды солнцестояний достигает многих дней и даже месяцев. Наконец, на самом полюсе, где горизонт является экватором, Солнце всегда над горизонтом, если оно с той же стороны от экватора, что и полюс, и неизменно под ним, если Солнце находится по другую сторону от экватора. Следовательно, в году бывает только один день и одна ночь.

Проследим более подробно движение Солнца. Прежде всего наблюдается неравенство интервалов времени, разделяющих равноденствия и солнцестояния: проходит приблизительно на 8 дней больше между весенним и осенним равноденствиями, чем между осенним и весенним. Следовательно, движение Солнца неравномерно. Точные и многократные наблюдения показали, что оно быстрее всего в точке солнечной орбиты, расположенной вблизи зимнего солнцестояния, и медленнее всего в противоположной точке орбиты — около летнего солнцестояния. В первом случае Солнце за сутки перемещается на $1.^g1327$ [$1.^\circ0194$] и только на $1.^g0591$ [$0.^\circ9532$] — во втором. Таким образом, в течение года суточное движение Солнца изменяется в сторону увеличения и уменьшения на триста тридцать восемь десятитысячных от его среднего значения.

Эти изменения, накапливаясь, вызывают очень заметное неравенство в движении Солнца. Чтобы определить его закон и, вообще, законы всех

периодических неравенств, можно положить, что синусы и косинусы углов, принимая те же значения при каждом обороте по мере того, как эти углы возрастают, могут представлять эти неравенства. Если выразить таким способом все неравенства небесных движений, то трудность будет заключаться только в отделении одних неравенств от других и в определении углов, от которых они зависят. Поскольку рассматриваемое неравенство восстанавливается при каждом солнечном обращении, естественно поставить его в зависимость от движения Солнца и его кратных. Таким образом, выражая неравенство рядом синусов, зависящих от этого движения, находим, что оно очень точно сводится к двум членам, из которых первый пропорционален синусу среднего углового расстояния Солнца от той точки орбиты, где его скорость наибольшая, а второй, приблизительно в 95 раз меньший, пропорционален синусу того же удвоенного расстояния.

Измерения видимого диаметра Солнца доказывают нам, что его расстояние до Земли так же переменно, как и его угловая скорость. Этот диаметр увеличивается и уменьшается, следуя тому же закону, по которому изменяется его скорость, но в отношении, вдвое меньшем. В момент наибольшей скорости этот диаметр равен $6035.^{cc}7$ $[1955.''6]$, в момент наименьшей скорости он составляет $5836.^{cc}3$ $[1891.''0]$, следовательно, средний диаметр равен $5936.^{cc}0$ $[1923.''3]$.

Так как расстояние Солнца от Земли обратно пропорционально его видимому диаметру, увеличение этого расстояния следует тому же закону, что и уменьшение этого диаметра. Ту точку орбиты, в которой Солнце ближе всего к Земле, называют *перигеем,* а противоположную точку, в которой это светило наиболее удалено, — *апогеем.* В первой из этих точек Солнце имеет наибольший видимый диаметр и наибольшую скорость. Во второй точке его видимый диаметр и скорость минимальны.

Чтобы уменьшить видимое движение Солнца, достаточно удалить его от Земли. Но если бы изменение движения Солнца имело одну эту причину и если бы истинная скорость была постоянна, его видимая скорость уменьшилась бы в том же отношении, что и видимый диаметр. Она же уменьшается в отношении, вдвое большем. Значит, при удалении Солнца от Земли в его истинном движении происходит действительное замедление. Совместным действием этого замедления и увеличения расстояния угловое движение Солнца уменьшается пропорционально увеличению квадрата расстояния, так что произведение его на этот квадрат весьма близко к постоянной величине. Все измерения видимого диаметра Солнца и сравнение их с наблюдениями его суточного движения подтверждают этот вывод.

Вообразим прямую, проходящую через центры Солнца и Земли, и назовем ее *радиусом-вектором* Солнца. Легко видеть, что маленький сектор или площадь, описанная радиусом-вектором вокруг Земли в течение суток, пропорциональны произведению квадрата этого вектора на видимое суточное движение Солнца. Следовательно, эта площадь постоянна, и полная площадь, описанная радиусом-вектором, начиная от некоторого неподвижного радиуса, возрастает пропорционально числу

суток, протекших с момента, когда Солнце находилось на этом радиусе. Таким образом, *площади, описанные его радиусом-вектором, пропорциональны времени.* Такое простое соотношение между движением Солнца и его расстоянием от фокуса его движения должно быть принято как фундаментальный закон его теории, по крайней мере до тех пор, пока наблюдения не вынудят нас его изменить.

Если изо дня в день отмечать положение и длину радиуса-вектора солнечной орбиты и провести кривую, соединяющую концы этих радиусов, то, исходя из предыдущих данных, увидим, что эта кривая несколько вытянута в направлении прямой, проходящей через центр Земли и соединяющей точки наибольшего и наименьшего расстояний до Солнца; подобие ее эллипсу породило мысль сравнить эти фигуры между собой, и в результате была установлена их идентичность. Отсюда следовало, что *солнечная орбита есть эллипс, в одном из фокусов которого находится центр Земли.*

*Эллипс* — одна из замечательных кривых, известных в древней и современной геометрии под названием *конических сечений.* Его легко описать, закрепив на двух неподвижных точках, называемых *фокусами,* концы нити и натянув ее скользящим вдоль нее по плоскости острием. Эллипс, вычерченный этим острием при его движении, заметно вытянут в направлении прямой, соединяющей фокусы; эта прямая, будучи продолжена в каждую сторону до пересечения с кривой, образует большую ось, длина которой равна длине нити. Малая ось есть прямая, проведенная через центр перпендикулярно большой оси и продолженная с каждой стороны до пересечения с кривой. Расстояние от центра до одного из фокусов есть *эксцентриситет* эллипса. Если фокусы сведены в одну точку, эллипс превращается в окружность; при удалении их друг от друга он все более и более удлиняется, и если их взаимное расстояние становится бесконечным, причем расстояние от фокуса до ближайшей вершины кривой остается конечным, эллипс становится *параболой.*

Солнечный эллипс мало отличается от окружности, потому что, как мы уже видели, самое большое расстояние Солнца от Земли отличается от среднего всего на 0.0168 этого расстояния. Этот избыток и есть тот самый эксцентриситет, очень медленное уменьшение которого, едва ощутимое на протяжении одного века, отмечается в наблюдениях.

Чтобы составить точное представление об эллиптическом движении Солнца, вообразим точку, движущуюся равномерно по окружности с центром в центре Земли и с радиусом, равным среднему расстоянию до Солнца. Кроме того, предположим, что эта точка и Солнце вместе выходят из перигея и что угловое движение точки равно среднему угловому движению Солнца. В то время как радиус-вектор точки равномерно вращается вокруг Земли, радиус-вектор Солнца движется неравномерно, всегда образуя с перигейным расстоянием и дугами эллипса секторы, пропорциональные времени. Сперва он опережает радиус-вектор точки и составляет с ним угол, который, достигнув некоторого предела, уменьшается и снова становится равным нулю, когда Солнце находится в своем апогее. В этот момент оба радиуса-вектора совпадают с боль-

шой осью. Во второй половине эллипса радиус-вектор точки в свою очередь опережает радиус Солнца и образует с ним углы в точности такие же, какие были в первой половине пути на соответствующих угловых расстояниях от перигея, где он снова совпадает с радиусом-вектором Солнца и большой осью эллипса.

Угол, на который радиус-вектор Солнца опережает радиус-вектор точки, называется *уравнением центра*. Его максимум был равен 2.$^g$13807 [1.°92426] в начале этого века, т. е. в полночь, начинающую 1 января 1801 г. Он уменьшается приблизительно на 53$^{cc}$ [17″] в столетие. Угловое движение точки вокруг Земли выводится из продолжительности оборота Солнца по своей орбите. Прибавив к этому движению уравнение центра, получим угловое движение Солнца. Вывод этого уравнения представляет интересную проблему анализа, которая может быть разрешена только путем приближений. Но малость эксцентриситета солнечной орбиты приводит к очень быстро сходящимся рядам, которые легко свести в таблицы.

Большая ось солнечного эллипса не закреплена на небе. По отношению к звездам она имеет годичное движение около 36$^{cc}$ [12″], направленное в ту же сторону, что и движение Солнца.

Солнечная орбита заметно приближается к экватору. Столетнее уменьшение наклонности эклиптики к плоскости этого большого круга можно оценить в 148$^{cc}$ [48″].

Эллиптическое движение Солнца еще не соответствует в точности современным наблюдениям. Однако их высокая точность позволила обнаружить небольшие неравенства, законы которых оказалось почти невозможным вывести из одних наблюдений. Таким образом, эти неравенства относятся к той ветви астрономии, которая исходит от причин к явлениям и которая будет предметом исследований четвертой книги.

Расстояние от Солнца до Земли во все времена интересовало наблюдателей. Они пробовали его определить всеми способами, какие им последовательно указывала астрономия. Наиболее естественным и простым является тот, который геометры используют для определения расстояния до земных предметов. Из двух концов известной базы наблюдают углы, которые составляют с ней направления на предмет и, вычтя их сумму из двух прямых углов, получают угол, образованный этими направлениями при их встрече. С этим углом, называемым *параллаксом* предмета, легко получить расстояния от предмета до концов базы. Применяя этот метод при исследовании Солнца, надо выбрать самую длинную базу, которую можно иметь на Земле.

Представим себе двух наблюдателей, расположенных на одном меридиане и наблюдающих в полдень расстояние центра Солнца от Северного полюса. Разность двух наблюденных расстояний будет равна углу, под которым из этого центра была бы видна прямая, соединяющая наблюдателей. Разность высот полюса дает эту прямую в долях земного радиуса. Поэтому будет легко вывести угол, под которым из центра Солнца был бы виден полудиаметр Земли. Этот угол есть *горизонтальный параллакс* Солнца, но он слишком мал и не может быть с точностью определен

таким способом, дающим лишь представление о том, что Солнце удалено, по меньшей мере, на девять тысяч земных диаметров. В дальнейшем мы увидим, что астрономические открытия дали нам способы, позволяющие определять параллакс со значительно большей точностью, и что теперь известна его величина, весьма близкая к $26.^{cc}54$ [$8.''6$] при среднем расстоянии от Земли. Отсюда следует, что это расстояние равно 23984 земным радиусам.

На поверхности Солнца наблюдаются черные пятна неправильной и изменяющейся формы. Иногда они многочисленны и очень обширны: наблюдались пятна размером в четыре—пять раз больше Земли. Иногда, но редко, в течение нескольких лет Солнце выглядит чистым, без пятен. Часто солнечные пятна окружены полутенью, которая в свою очередь окружена областями, более яркими, чем остальная поверхность Солнца; в этих ярких областях видно, как пятна формируются и исчезают. Природа пятен пока неизвестна, но они позволили нам узнать об одном замечательном явлении — вращении Солнца. Помимо изменений положений и величины пятен, можно различить их регулярное движение, в точности такое, какое было бы у соответствующих точек на поверхности Солнца, если предположить, что это светило вращается вокруг оси, почти перпендикулярной к эклиптике, в направлении своего движения вокруг Земли. Из последовательных наблюдений пятен было выведено, что продолжительность одного полного оборота Солнца равна приблизительно двадцати пяти с половиной суткам и что солнечный экватор наклонен на $8^1/_3$ градов [$7.^\circ5$] к плоскости эклиптики.

Большие солнечные пятна почти всегда расположены в зоне поверхности Солнца, ширина которой, измеренная по солнечному меридиану, не превышает $34^g$ [$31^\circ$] в обе стороны от его экватора. Однако их наблюдали и на расстоянии $44^g$ [$40^\circ$].

Перед восходом и после захода Солнца, особенно около дня весеннего равноденствия, можно заметить слабое свечение. Это свечение было названо *зодиакальным светом.* Оно белого цвета и имеет форму веретена, основание которого опирается на солнечный экватор. Таким мы увидели бы очень сжатый сфероид вращения, центр и экватор которого совпадали бы с солнечными. Иногда его длина кажется превышающей угол в $100^g$ [$90^\circ$]. Флюид, который отражает нам этот свет, должен быть чрезвычайно разреженным, так как через него видны звезды. По наиболее общему мнению, этот флюид — атмосфера Солнца. Но эта атмосфера отнюдь не простирается на такое большое расстояние. В конце этого труда мы предложим некоторые соображения о до сих пор неизвестной причине этого света.

## Глава III

### О ВРЕМЕНИ И ЕГО ИЗМЕРЕНИИ

Время для нас есть впечатление, оставляемое в памяти рядом событий, которые, как мы уверены, протекали последовательно. Для измерения времени удобно использовать движение. Действительно, так как любое тело не может быть одновременно в нескольких местах, оно переходит из одного положения в другое, лишь последовательно проходя через все промежуточные точки. Если в каждой точке описываемого им пути оно движимо одной и той же силой, его движение равномерно, и части этого пути могут измерять время, затраченное на их пробег. Когда в конце каждого качания маятник оказывается в совершенно сходных условиях, продолжительности его колебаний равны, и время может измеряться их числом. Для этого измерения можно также применять обращения небесной сферы, в которых все представляется постоянным. Но было единодушно принято использовать для этой цели движение Солнца, возвращения которого к меридиану и к одному и тому же равноденствию или солнцестоянию образуют сутки и годы.

В обыденной жизни день — это промежуток времени, протекающий с восхода до захода Солнца, ночь — время, в течение которого Солнце остается под горизонтом. Астрономические сутки охватывают всю продолжительность вращения. Это время, заключенное между двумя последовательными полуднями или полуночами. Оно превышает продолжительность одного оборота неба, который образует *звездные сутки*. Это происходит потому, что если Солнце пересечет меридиан одновременно со звездой, на следующие сутки оно возвратится позже из-за своего собственного движения с запада на восток. На протяжении года оно пройдет через меридиан на один раз меньше, чем звезда. Таким образом, находим, что, если взять за единицу средние астрономические сутки, продолжительность звездных суток будет 0.99726957.

Астрономические сутки не одинаковы. Две причины порождают их различие — неравенство собственного движения Солнца и наклонность эклиптики. Влияние первой причины очевидно. Так, во время летнего солнцестояния, около которого движение Солнца наиболее медленно, астрономические сутки больше приближаются к звездным суткам, чем при зимнем солнцестоянии, когда движение Солнца наиболее быстро.

Чтобы понять действие второй причины, надо помнить, что избыток астрономических суток над звездными обусловливается лишь собственным движением Солнца по отношению к экватору. Если представить себе два больших круга небесной сферы, проведенных через полюсы и концы малой дуги, которую Солнце описывает по эклиптике за одни сутки, дуга экватора, пересекаемая ими, дает суточное движение Солнца, отнесенное к экватору, и время, затрачиваемое ею для прохождения меридиана, равно избытку астрономических суток над звездными. Очевидно, что во время равноденствий дуга экватора меньше, чем соответствующая дуга эклиптики, в отношении косинуса угла наклона эклип-

тики к радиусу. Во время солнцестояний она больше в отношении радиуса к косинусу того же наклона. Следовательно, астрономические сутки уменьшены в первом случае и увеличены во втором.

Чтобы иметь средние сутки, независимые от этих причин, воображают второе Солнце, двигающееся равномерно по эклиптике и пересекающее большую ось солнечной орбиты всегда одновременно с истинным Солнцем, что исключает неравенство собственного движения Солнца. Затем исключают влияние наклонности эклиптики, вообразив третье Солнце, проходящее через точки равноденствия в те же моменты, что и второе Солнце, и движущееся по экватору таким образом, что угловые расстояния двух этих воображаемых светил от точки весеннего равноденствия остаются постоянно одинаковыми. Интервал времени, заключенный между двумя последовательными прохождениями этого третьего Солнца через меридиан, образует средние астрономические сутки. *Среднее время* измеряется числом этих возвращений, а *истинное время* — числом возвращений к меридиану истинного Солнца. Дуга экватора, заключенная между двумя меридианами, проведенными через центры истинного и третьего Солнца, выраженная во времени, считая один полный оборот за сутки, называется *уравнением времени.*

Сутки делятся на 24 часа и начинаются в полночь. Час разделен на 60 минут, минута — на 60 секунд, секунда — на 60 терций и т. д. Но деление суток на 10 часов, часа на 100 минут, минуты на 100 секунд гораздо удобнее в астрономии, и мы примем его в настоящей работе.

Второе Солнце, которое мы вообразили, своими прохождениями через экватор и тропики определяет средние равноденствия и солнцестояния. Промежуток времени между его возвращениями к тому же равноденствию или к тому же солнцестоянию образует тропический год, величина которого в настоящее время равна 365.$^{d}$2422419. Наблюдения показали, что Солнце затрачивает больше времени на возвращение к одним и тем же звездам. Это есть *звездный год*, который длиннее тропического года на 0.$^{d}$014119. Таким образом, точки равноденствия движутся вспять по эклиптике, в направлении, обратном собственному движению Солнца, и в этом движении каждый год они проходят дугу, равную среднему движению этого светила за время 0.$^{d}$014119, т. е. 154.$^{cc}$63 [50.″1]. В разные века это движение не совсем одинаково, из-за чего немного изменяется длина тропического года: теперь она приблизительно на 13$^{c}$ [11$^{s}$] короче, чем во времена Гиппарха.

Начинать год следует с одного из равноденствий или солнцестояний. Если начать год с летнего солнцестояния или осеннего равноденствия, то одни и те же занятия и работы разделились бы на две части и распределились бы на два последовательных года. Это было бы неудобно, подобно тому, как согласно древнему обычаю астрономов, сутки начинались в полдень. Представляется, что весеннее равноденствие — время возрождения природы, должно бы быть и моментом возобновления года; столь же естественно начинать его с зимнего солнцестояния, которое в древности праздновалось как эпоха возрождения Солнца и которое под полюсом является серединой великой ночи года.

Если бы гражданский год был постоянно равен 365 суткам, его начало всегда предваряло бы начало истинного тропического года, и оно проходило бы вспять все сезоны за период около 1508 лет. Но такой год, некогда применявшийся в Египте, лишает календарь удобства относить месяцы и праздники к одним и тем же временам года и отмечать сроки, важные для сельского хозяйства.

Можно было бы сохранить это ценное для сельских жителей преимущество, рассматривая начало года как астрономическое явление, фиксируемое путем вычислений в полночь, предшествующую солнцестоянию или равноденствию. Именно так было сделано во Франции в конце прошлого века. Но в этом случае високосные годы, или годы в 366 суток, включались бы по очень сложному закону, и было бы трудно разложить какое-нибудь число лет на дни, что вносило бы путаницу в историю и хронологию. Кроме того, начало года, которое всегда необходимо знать заранее, становилось бы не точно определяемым и спорным в случае, когда оно приближалось бы к полночи на величину, меньшую, чем ошибка солнечных таблиц. Наконец, порядок високосных годов был бы различным на разных меридианах, что создавало бы препятствие для весьма желательного принятия разными народами одного и того же календаря. В самом деле, видя, что каждый народ считает географические долготы от своей главной обсерватории, можно ли поверить, что все они согласятся, чтобы начало года считалось от одного общего меридиана? Следовательно, здесь надо отступить от природы и прибегнуть к искусственному, но регулярному и удобному методу включения високосных годов. Самый простой из них — это метод, введенный Юлием Цезарем в римском календаре. Он состоит во включении високосного года раз в каждые четыре года. Однако если даже краткий срок жизни достаточен, чтобы ощутимо отодвинуть начало счета египетских лет от солнцестояния или равноденствия, то нужно всего несколько веков, чтобы осуществилось такое же отклонение начала счета юлианских лет. Это делает необходимым более сложный способ включения.

В XI в. персы придумали способ, замечательный по своей точности и простоте. Он состоит в том, чтобы делать високосным годом каждый четвертый год семь раз подряд, а восьмой раз изменять лишь пятый год. Это предполагает длину тропического года равной $365^d 8/33$, т. е. только на $0.^d0001823$ больше года, определяемого из наблюдений. В результате понадобилось бы множество веков, чтобы заметно сместить начало гражданского года. Способ включения дней в григорианском календаре несколько менее точен, но позволяет проще переводить годы и века в дни, что является одним из главных назначений календаря. Он состоит в том, чтобы считать високосным каждый четвертый год, исключая его в конце каждого века, кроме каждого четвертого столетия. Длина такого года равна $365^d 97/400$, или $365.^d242500$, что на 0.0002581 длиннее истинного года. Но если, следуя аналогии такого способа, исключать еще один високосный год каждые четыре тысячи лет, что сократит их число до 969 за этот интервал времени, длина года будет $365^d 969/4000$, или $365.^d24225$; это так приближает его к длине $365.^d2422419$, определенной

из наблюдений, что можно пренебречь их разностью, учитывая неточность наблюдений длины года, которая к тому же не совсем постоянна.

Деление года на 12 месяцев — очень древнее и почти повсеместное. Некоторые народы положили месяцы одинаковыми и равными 30 дням. Эти народы дополняют год необходимым числом дней. Другие народы распределяют весь год на 12 месяцев, делая их неодинаковыми. Система тридцатидневных месяцев естественно приводит к их делению на три декады. Такое деление облегчает нахождение в любой момент числа месяца. Но в конце года дополнительные дни нарушают порядок событий, связанных с разными днями декады, что требует введения неудобных административных мер. Это затруднение устраняется введением короткого периода, независимо от месяцев в году. Такова *неделя*, которая с глубокой древности, где теряется ее происхождение, в течение веков без перерыва была принята у людей, входя в сменяющие друг друга календари разных народов. Очень примечательно, что на всей Земле она оказывается одинаковой как по названиям ее дней, установленным по наиболее древней астрономической системе, так и по их соответствию одним и тем же физическим моментам. Быть может, это самый древний и самый неоспоримый памятник человеческих знаний: он, по-видимому, указывает на общий источник их распространения. Но астрономическая система, служащая его основанием, доказывает несовершенство человеческих знаний в этом общем источнике.

При реформе григорианского календаря за начало года было бы легко принять зимнее солнцестояние, что позволило бы совместить начало каждого сезона с началом месяца. Было бы также легко сделать более равномерной продолжительность месяцев, установив 29 дней в феврале обычных годов и 30 дней в високосные годы, остальные месяцы попеременно — в 31 и 30 дней. Было бы удобно обозначать их по порядковому номеру. Исправив, как было сказано, принятый способ включения високосных годов, мы получили бы григорианский календарь, не оставляющий желать почти ничего лучшего. Но следует ли придавать ему такую степень совершенства? Мне кажется, что в результате мы не получили бы достаточных выгод, могущих компенсировать затруднения, вводимые подобным изменением в наши привычки, в наши сношения с другими народами и в хронологию, уже и так слишком осложненную множеством различных эр. Если принять во внимание, что этот календарь теперь является календарем почти всех народов Европы и Америки и что потребовалось два века и все влияние религии, чтобы обеспечить ему эту универсальность, мы почувствуем, как важно сохранить ему такое ценное преимущество, даже за счет совершенства, не затрагивающего его основных черт, так как главное назначение календаря — дать простой способ привязывать события к последовательности дней и легким способом включения фиксировать в одном и том же сезоне начало года — условия, хорошо выполняющиеся в григорианском календаре.

Совокупность ста лет образует *век* — самый длинный период, применяемый до сих пор при измерении времени, так как самые древние известные нам явления еще не требуют более длинных периодов.

## Глава IV

## О ДВИЖЕНИЯХ ЛУНЫ, ЕЕ ФАЗАХ И ЗАТМЕНИЯХ

Среди всех небесных тел после Солнца нас более всего интересует Луна, фазы которой дают нам такое замечательное подразделение времени, что оно первоначально применялось всеми народами. Как и Солнце, Луна имеет собственное движение с запада на восток. В начале этого столетия продолжительность ее обращения относительно звезд была равна $27.^{d}321661423$. Эта продолжительность не всегда одинакова, и сравнение новейших наблюдений с древними бесспорно доказывает ускорение среднего движения Луны. Это ускорение, еще мало ощутимое со времен самого древнего из известных нам затмений, увеличивается с течением времени. Но будет ли оно увеличиваться непрерывно или остановится с тем, чтобы перейти в замедление? Это можно определить только после многих веков наблюдений. К счастью, открытие причин ускорения, опережая время, позволило нам узнать, что оно имеет периодический характер. В начале века среднее угловое расстояние Луны от точки весеннего равноденствия, отсчитанное от этого равноденствия в направлении ее собственного движения, в полночь среднего времени в Королевской обсерватории Парижа было равно $124.^{g}01321$ [$111.^{\circ}61189$].

Луна движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Земля. Радиус-вектор Луны описывает вокруг этой точки площади, почти пропорциональные времени. Если принять среднее расстояние Луны от Земли за единицу, то эксцентриситет ее эллипса равен 0.0548442, что дает самое большое уравнение центра, равное $6.^{g}9854$ [$6.^{\circ}2869$]. Оно представляется неизменным.

Движение лунного перигея прямое, т. е. оно направлено в сторону собственного движения Солнца. В начале века продолжительность сидерического обращения лунного перигея была равна $3232.^{d}575343$, а его среднее угловое расстояние от точки весеннего равноденствия составляло $295.^{g}68037$ [$266.^{\circ}11233$]. Его движение неравномерно: оно замедляется, в то время как движение Луны ускоряется.

Законы эллиптического движения еще далеки от того, чтобы точно представлять наблюдения Луны: ее движения подвержены большому числу неравенств, имеющих очевидное отношение к положению Солнца. Мы укажем на три главных из них.

Наибольшее и первое, которое было обнаружено, носит название *эвекции*. Это неравенство в своем максимуме доходит до $1.^{g}4907$ [$1.^{\circ}3416$] и пропорционально синусу двойного углового расстояния Луны от Солнца без углового расстояния Луны в перигее. В противостояниях и в соединениях Луны с Солнцем оно смешивается с уравнением центра, постоянно его уменьшая. По этой причине древние астрономы, которые определяли элементы лунной теории только с помощью затмений и с целью предсказания этих явлений, получали меньшее уравнение центра Луны, чем действительное, на полную величину эвекции.

В лунном движении наблюдается еще одно большое неравенство, исчезающее при соединениях и противостояниях Луны и Солнца, а также в точках, где эти два светила отдалены друг от друга на четверть окружности. В своем максимуме оно достигает $0.^{g}6611$ [$0.^{\circ}5950$], когда расстояние между ними равно $50^{g}$ [$45^{\circ}$]; отсюда следует, что это неравенство пропорционально синусу двойного расстояния Луны от Солнца. Это неравенство, называемое *вариацией* и исчезающее во время затмений, не могло быть обнаружено при наблюдении этих явлений.

Наконец, движение Луны убыстряется, когда замедляется движение Солнца, и наоборот. Отсюда вытекает неравенство, известное под названием *годичного уравнения*, закон которого в точности таков же, как закон движения центра Солнца, но с обратным знаком. Это неравенство, достигающее в максимуме $0.^{g}2074$ [$0.^{\circ}1867$], при затмениях смешивается с уравнением центра Солнца, и при вычислении момента этого явления безразлично, рассматривать ли эти два уравнения по отдельности или исключить годичное уравнение из лунной теории и увеличить на такую же величину уравнение движения центра Солнца. По этой же причине древние астрономы преувеличивали эксцентриситет солнечной орбиты, как они преуменьшали по причине эвекции эксцентриситет лунной орбиты.

Эта орбита наклонена на $5.^{g}7185$ [$5.^{\circ}1466$] к эклиптике. Точки ее пересечения с ней, называемые *узлами*, не зафиксированы на небе: они имеют попятное, т. е. противоположное лунному, движение, которое легко обнаружить по последовательности звезд, встречаемых Луной при пересечении ею эклиптики. *Восходящим узлом* называют тот, в котором Луна поднимается над эклиптикой в сторону Северного полюса, а *нисходящим* тот, в котором она опускается под эклиптику, к Южному полюсу. Продолжительность сидерического оборота узлов в начале века была равна $6793.^{d}39108$, и среднее расстояние восходящего узла от точки весеннего равноденствия было $15^{g}.46117$ [$13.^{\circ}91505$]. Но движение узлов замедляется от века к веку. Оно подвержено нескольким неравенствам, из которых самое большое пропорционально синусу двойного расстояния Луны от Солнца и в максимуме достигает $1.^{g}8102$ [$1.^{\circ}6292$]. Наклонность орбиты — также переменная величина. Самое большое ее неравенство, которое в максимуме достигает $0.^{g}1627$ [$0.^{\circ}1464$], пропорционально косинусу того же угла, от которого зависит неравенство движения узлов, но средняя наклонность в разные века представляется постоянной, несмотря на вековые изменения плоскости эклиптики.

Лунная орбита и, вообще, орбиты Солнца и всех небесных тел не более реальны, чем параболы, описываемые снарядами на поверхности Земли. Чтобы представить движение тела в пространстве, воображают линию, проведенную через все последовательные положения его центра. Эта линия и есть его орбита, неизменная или изменяющаяся плоскость которой проходит через два последовательных положения тела и через точку, принимаемую нами за центр этого движения.

Вместо того, чтобы так рассматривать движение тела, можно мысленно проектировать его на неподвижную плоскость и определять его

проекцию и высоту над этой плоскостью. Этот очень простой способ применяется астрономами в таблицах движения небесных тел.

Видимый диаметр Луны изменяется аналогично изменению лунного движения: на самом большом расстоянии от Земли он равен $5438^{cc}$ [1762″], а при самом малом составляет $6207^{cc}$ [2011″].

Те же способы определения, при которых благодаря своей малости ускользнул солнечный параллакс, дали средний параллакс Луны, равный $10\,661^{cc}$ [3421.″8]. На таком расстоянии, на котором это светило видно нам под углом $5823^{cc}$ [1886.″7], Земля была бы видна под углом $21\,332^{cc}$ [6911.″6]; следовательно, отношение их диаметров равно отношению этих чисел или почти трем одиннадцатым, и объем лунного шара в сорок девять раз меньше земного.

Лунные фазы — одно из наиболее впечатляющих небесных явлений. Выходя вечером из солнечных лучей, Луна появляется в виде узкого серпа, который увеличивается по мере ее удаления от Солнца и делается полным светящимся кругом во время противостояния с этим светилом. Когда она снова приближается к нему, ее фазы уменьшаются, так же как они возрастали раньше, до тех пор, пока она не погрузится утром в солнечные лучи. Серп Луны, постоянно обращенный выпуклостью к Солнцу, несомненно указывает, что она заимствует его свет, и закон изменения ее фаз, ширина которых увеличивается почти точно пропорционально синусу-верзусу углового расстояния Луны от Солнца, доказывает, что она имеет сферическую форму.

Возвращение фаз зависит от избытка движения Луны над движением Солнца, избытка, который называют *синодическим* лунным движением. Продолжительность синодического обращения этого светила, или период его средних соединений, в настоящее время равен 29.530588716 суток, что почти точно относится к тропическому году как 19 к 235, т. е. 19 солнечных лет заключают около 235 лунных месяцев.

*Сизигиями* называются те точки лунной орбиты, в которых Луна находится в соединениях или противостояниях с Солнцем. В первом случае мы имеем новолуние, во втором — полнолуние. *Квадратуры* — те точки, в которых Луна отдалена от Солнца на $100^{g}$ [90°] или $300^{g}$ [270°], считая по направлению ее собственного движения. В этих точках, которые называются первой и второй *четвертью* Луны, мы видим половину ее освещенной полусферы. Строго говоря, мы видим немного больше, так как в тот момент, когда нам открывается точно половина Луны, ее расстояние от Солнца немного меньше $100^{g}$ [90°]. В этот момент, который определяется тем, что линия, разделяющая освещенную и темную полусферы Луны, представляется прямой, луч, проведенный от наблюдателя к центру Луны, перпендикулярен к линии, соединяющей центры Луны и Солнца. Таким образом, в треугольнике, образованном прямыми, соединяющими эти центры и глаз наблюдателя, угол при Луне прямой, а наблюдение дает угол при наблюдателе. Это позволяет определить расстояние от Солнца до Земли в долях расстояния от Земли до Луны. Трудность точного определения момента, в который мы видим половину освещенного диска Луны, делает этот метод неточным. Однако именно благодаря ему были полу-

чены первые представления об огромном объеме Солнца и большом расстоянии от него до Земли.

Объяснение лунных фаз приводит к истолкованию затмений — предмета ужаса в непросвещенные века и любопытства народов всех времен. Луна может затмеваться только тогда, когда непрозрачное тело лишает ее солнечного света, и очевидно, что это тело — Земля, поскольку затмения Луны происходят только во время ее противостояний, т. е. тогда, когда Земля находится между Луной и Солнцем. Земной шар отбрасывает позади себя относительно Солнца конус тени, ось которого совпадает с прямой, соединяющей центры Солнца и Земли; он кончается в точке, в которой видимые диаметры этих двух тел были бы одинаковы. Эти диаметры, видимые из центра Луны во время ее противостояния и на среднем расстоянии, приблизительно равны $5920^{cc}$ [1918″] у Солнца и $21322^{cc}$ [6908″] — у Земли. Таким образом, длина конуса земной тени, по крайней мере, в три с половиной раза больше, чем расстояние от Луны до Земли, а его ширина в точках, где он пересекается Луной, близка к восьми третям лунного диаметра. Поэтому если бы плоскость лунной орбиты совпадала с плоскостью эклиптики, Луна затмевалась бы при каждом противостоянии с Солнцем. Но вследствие наклона этих плоскостей во время противостояний Луна часто оказывается приподнятой выше или опущенной ниже конуса земной тени и попадает в него только тогда, когда она близка к узлам своей орбиты. Если весь ее диск погружается в земную тень — затмение Луны *полное*. Оно называется *частным*, если этот диск заходит в тень только своей частью, и можно понять, что степень близости Луны к узлам своей орбиты во время противостояний дает все разнообразие вида наблюдаемых затмений.

Каждая точка Луны перед своим затмением последовательно теряет свет от разных частей солнечного диска. Поэтому ее яркость уменьшается постепенно и исчезает в момент попадания в земную тень. Пространство, в котором происходит это уменьшение яркости, названо *полутенью*, и ширина его равна диаметру Солнца, видимому из центра Земли.

Средняя продолжительность обращения Солнца относительно узла лунной орбиты равна $346.^{d}619851$. Она относится к синодическому периоду обращения Луны почти в точности, как 223 к 19. Таким образом, по истечении периода в 223 лунных месяца Луна и Солнце вновь оказываются в таком же положении относительно узла лунной орбиты. Поэтому и затмения должны повторяться почти в таком же порядке. Это дает простой способ их предсказания, который использовали древние астрономы. Однако неравенства в движениях Солнца и Луны должны производить ощутимые изменения. Кроме того, возвращение этих двух светил к начальному положению по отношению к узлу в интервале 223 месяцев происходит не точно. Из-за этого отклонения со временем изменяется порядок затмений, наблюдаемых в одном из таких периодов.

Круглая форма земной тени при лунных затмениях привела первых астрономов к мысли о почти сферической фигуре Земли. В дальнейшем мы увидим, что усовершенствованная теория Луны дала, может быть, самый точный способ определения сжатия Земли.

Соединения Солнца и Луны, когда она располагается между Солнцем и Землей и закрывает от нас солнечный свет, доставляют единственную возможность наблюдать солнечные затмения. Хотя Луна несравненно меньше Солнца, она находится достаточно близко от Земли, чтобы ее видимый диаметр мало отличался от солнечного. Вследствие изменения этих диаметров случается даже, что они попеременно превосходят один другого. Представим себе, что центры Солнца и Луны находятся на одной прямой с глазом наблюдателя и он видит затмение Солнца. Если видимый диаметр Луны превосходит солнечный, затмение будет полным, но если он меньше солнечного, наблюдатель увидит светящееся кольцо, образованное той частью Солнца, которая не перекрывается диском Луны, и в этом случае затмение будет *кольцеобразным*. Если, наконец, центр Луны не находится на прямой, соединяющей глаз наблюдателя и центр Солнца, Луна сможет затмить только часть солнечного диска, и затмение будет *частным*. Итак, вариации расстояний Солнца и Луны от центра Земли и расстояний Луны от узлов ее орбиты в момент соединений приводят к очень большому разнообразию солнечных затмений. К этому прибавляется еще возвышение Луны над горизонтом, которое изменяет ее видимый диаметр и вследствие влияния лунного параллакса может увеличить или уменьшить видимое расстояние центров Солнца и Луны так, что один из двух удаленных друг от друга наблюдателей может видеть солнечное затмение, которое не увидит другой. В этом солнечные затмения отличаются от лунных, которые одинаковы для всех точек Земли, где это светило находится над горизонтом.

Часто можно видеть, как тень, падающая от тучи, уносимой ветром, быстро пробегая по холмам и равнинам, закрывает от настигнутых ею зрителей вид Солнца, которым наслаждаются находящиеся вне ее пределов. Это точный образ полного солнечного затмения, во время которого вокруг лунного диска заметна корона из слабого света, представляющая собой, вероятно, атмосферу Солнца, так как по своей протяженности она не может соответствовать лунной атмосфере, поскольку последняя, как в этом убедились по затмениям Солнца и звезд, почти неощутима.

Атмосфера, которую можно представить себе вокруг Луны, отклоняет световые лучи к ее центру, и если, как это должно быть, атмосферные слои становятся более разреженными с высотой, эти лучи, проникая в нее, отклоняются все больше и больше и образуют кривую, вогнутую к лунной поверхности. Поэтому наблюдатель, находящийся на Луне, перестал бы видеть светило, только спустившись ниже своего горизонта на угол, называемый *горизонтальной рефракцией*. Лучи, излучаемые этим светилом, видимым на горизонте, коснувшись поверхности Луны, продолжают свой путь, описывая кривую, похожую на ту, по которой они пришли. Следовательно, второй наблюдатель, расположенный относительно светила позади Луны, все же увидел бы его вследствие отклонения луча в лунной атмосфере. Диаметр Луны из-за рефракции в ее атмосфере заметно не увеличивается; звезда затмевается этим светилом несколько позже, чем она затмилась бы при отсутствии атмосферы. По этой же причине она раньше выходит из затмения. Таким образом, лунная атмо-

сфера оказывает влияние главным образом на продолжительность затмений Солнца и звезд Луной. Однако точные и многократные наблюдения позволили лишь едва заподозрить это влияние, и было установлено, что на поверхности Луны горизонтальная рефракция не превышает $5^{cc}$ [1.″6]. На Земле эта рефракция, по крайней мере, в тысячу раз больше. Таким образом, лунная атмосфера, если она существует, обладает исключительной разреженностью, превосходящей достигаемую нами с помощью лучших пневматических насосов. Отсюда мы должны сделать вывод, что никакие из земных животных не могли бы дышать и жить на Луне и что если она все же обитаема, то только животными совсем другого рода. Имеется основание думать, что на поверхности Луны все твердое, так как в большие телескопы она представляется безводным телом, на котором, как полагают, замечена деятельность вулканов и даже их извержения.

Бугер экспериментально нашел, что свет полной Луны приблизительно в триста тысяч раз слабее солнечного. Этим объясняется, почему лунный свет, собранный в фокусе самых больших зеркал, не производит сколько-нибудь заметного действия на термометр.

Можно различить, особенно вблизи новолуния, ту часть лунного диска, которая не освещена Солнцем. Эта слабая освещенность, которую называют *пепельным светом*, по крайней мере, в большей своей части вызвана светом, отражающимся на Луну освещенной земной полусферой. Это подтверждается тем, что пепельный свет становится заметнее около новолуния, когда самая большая часть освещенной земной полусферы обращена к Луне. В самом деле, очевидно, что Земля являла бы наблюдателю, находящемуся на Луне, фазы, похожие на те, которые нам являет Луна, но вследствие большей протяженности поверхности Земли более яркие.[1]

Лунный диск представляется нам покрытым большим числом неизменяющихся пятен, которые были с большой тщательностью наблюдены и описаны. Они доказывают, что Луна всегда повернута к нам почти одним и тем же полушарием, а это значит, что она вращается вокруг своей оси за время, равное времени ее обращения вокруг Земли. Действительно, если вообразить наблюдателя, помещенного в центр Луны, предполагаемой прозрачной, он увидит Землю и свой луч зрения вращающимися вокруг себя, и так как этот луч пересекает поверхность Луны приблизительно в одной и той же точке, ясно, что эта точка должна вращаться за то же время и в ту же сторону, что и Земля вокруг наблюдателя.

Однако систематические наблюдения лунного диска обнаружили небольшие изменения в его виде: можно заметить, что пятна попеременно то приближаются, то отдаляются от его краев. Те из них, которые очень близки к краям, исчезают и появляются вновь, совершая периодические колебания, которые были названы *либрациями Луны*. Чтобы представить себе главные причины этого явления, надо учесть, что лунный диск, видимый из центра Земли, ограничивается окружностью лунного шара, перпендикулярной к лучу зрения. На плоскость этого круга проектируется обращенная к Земле полусфера Луны, внешний вид которой зависит от ее вращательного движения. Если бы Луна не имела вращательного дви-

жения, ее радиус-вектор при каждом лунном обороте описывал бы по ее поверхности окружность большого круга, все части которого последовательно представлялись бы нашему зрению. Но в то время как вектор стремится описать эту окружность, лунный шар, вращаясь, все время с большой точностью возвращает на этот радиус одну и ту же точку своей поверхности и, следовательно, то же полушарие — к Земле. Неравенства в движении Луны приводят к небольшим различиям в ее облике. Вращательное движение Луны, не участвуя в этих неравенствах заметным образом, непостоянно относительно радиуса-вектора, который поэтому пересекает лунную поверхность в разных точках. Вследствие этого лунный шар совершает относительно этого радиуса колебания, соответствующие неравенствам своего движения, и попеременно то скрывает, то открывает часть своей поверхности.

Однако лунный шар испытывает еще другую либрацию, по широте, перпендикулярную описанной. Из-за нее области, расположенные около полюсов вращения Луны, попеременно исчезают и появляются вновь. Чтобы понять сущность этого явления, предположим, что ось вращения перпендикулярна к плоскости эклиптики. Когда Луна будет в своем восходящем узле, оба ее полюса будут на южном и северном краях видимого полушария. По мере возвышения над эклиптикой Северный полюс и ближайшие к нему области исчезнут из вида, тогда как области, близкие к Южному полюсу, будут открываться все больше и больше до того момента, когда светило, достигнув своей самой большой северной широты, начнет возвращаться к эклиптике. Описанные явления тогда повторяются в обратном порядке. Когда же Луна, достигнув нисходящего узла, затем опустится под эклиптику, у Северного полюса произойдут те же явления, которые имели место у Южного.

Ось вращения Луны не совсем точно перпендикулярна к эклиптике, и ее наклон приводит к явлениям, которые можно понять, вообразив, что она движется по самой эклиптике таким образом, что ее ось вращения все время остается параллельной самой себе. Ясно, что тогда каждый полюс будет виден на продолжении половины обращения Луны вокруг Земли и не виден во время второй половины, так что области, расположенные очень близко к полюсам, будут попеременно открываться и исчезать.

Наконец, наблюдатель находится не в центре Земли, а на ее поверхности, и середину видимого им полушария Луны определяет луч зрения, проведенный от его глаза в центр Луны. Ясно, что вследствие лунного параллакса этот луч в зависимости от высоты этого светила над горизонтом пересекает поверхность Луны в существенно различных точках.

Все эти причины создают только видимую либрацию Луны. Они являются чисто оптическими и нисколько не влияют на ее действительное движение. Это движение может, однако, подвергаться небольшим неравенствам, но они едва ощутимы.[2]

Иначе обстоит дело с изменениями плоскости лунного экватора. Усердные наблюдения пятен на Луне позволили Доминико Кассини обнаружить, что ось этого экватора вовсе не перпендикулярна к эклиптике, как это предполагали раньше, и что ее последовательные положения не в точ-

ности параллельны между собой. Этот великий астроном пришел к следующим результатам, представляющим одно из его самых прекрасных открытий и охватывающим всю астрономическую теорию истинной либрации Луны. Если вообразить первую плоскость, проходящую через центр Луны перпендикулярно ее оси вращения и совпадающую с экватором, вторую плоскость, проходящую через тот же центр параллельно эклиптике, и третью плоскость — плоскость лунной орбиты, то если отвлечься от периодических неравенств наклонности и узлов Луны, эти три плоскости постоянно будут иметь общую линию пересечения. Вторая плоскость, расположенная между двумя другими, составляет с первой угол около $1.^{g}67$ [$1.^{o}50$], и с третьей — угол в $5.^{g}7155$ [$5.^{o}1440$]. Таким образом, пересечения лунного экватора с эклиптикой, или его узлы, всегда совпадают со средними узлами лунной орбиты и, как и они, имеют обратное движение, период которого равен 6793.39108 суток. В этом интервале оба полюса экватора и лунной орбиты описывают небольшие окружности, параллельные эклиптике; при этом ее полюс располагается таким образом, что эти три полюса находятся постоянно на большом круге небесной сферы.

На поверхности Луны возвышаются высокие горы. Их тени, падая на равнины, образуют пятна, которые изменяются в зависимости от положения Солнца. На краю освещенной части лунного диска горы представляются в виде зубцов, которые простираются за пределы линии освещения на величину, измерение которой показало, что их высота, по крайней мере, три тысячи метров. По направлению теней было выяснено, что лунная поверхность усеяна глубокими впадинами, похожими на наши моря. Наконец, представляется, что эта поверхность имеет следы вулканических извержений. Возникновения новых пятен и вспышек, много раз наблюдавшихся на темной стороне, как будто даже указывают на активную вулканическую деятельность.

## Глава V

## О ПЛАНЕТАХ, ОСОБЕННО О МЕРКУРИИ И ВЕНЕРЕ

Среди бесконечного числа сверкающих точек, которыми усыпан небесный свод и которые сохраняют почти постоянное взаимное положение, десять светил, всегда видимых, если они не погружены в солнечные лучи, двигаются по весьма сложным законам, исследование которых составляет одну из основных задач астрономии. Из этих светил, названных *планетами,* Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн были известны еще в самой глубокой древности, так как их можно видеть простым глазом, а Уран, Церера, Паллада, Юнона и Веста своим недавним открытием обязаны телескопам. Две первые из этих планет не отдаляются от Солнца дальше определенных пределов. Другие удаляются на все угловые расстояния. Движения всех этих тел заключены в поясе небесной сферы, на-

званном *зодиаком*, разделяемом по ширине на две равные части плоскостью эклиптики.

Меркурий никогда не отдаляется от Солнца за пределы 32$^g$ [29°]. Когда он начинает появляться по вечерам, его едва можно различить в лучах вечерней зари. В последующие дни он все больше и больше освобождается от них и, удалившись от Солнца приблизительно на 25$^g$ [23°], снова возвращается к нему. В этом интервале движение Меркурия относительно звезд прямое. Но когда при своем приближении к Солнцу он оказывается от него на расстоянии, не превышающем 20$^g$ [18°], он кажется остановившимся, после чего его движение становится обратным. Затем Меркурий продолжает приближаться к Солнцу и наконец погружается вечером в его лучи. После некоторого периода, когда он невидим, его можно снова заметить утром выходящим из солнечных лучей и удаляющимся от Солнца. Его движение оказывается обратным, как и перед исчезновением, но, отдалившись от Солнца на расстояние в 20$^g$ [18°], он снова останавливается и затем начинает прямое движение; он продолжает удаляться от Солнца до расстояния в 25$^g$ [23°], потом снова приближается к нему и утром погружается в лучи зари, чтобы вскоре снова появиться вечером и повторить такие же явления.

Размах наибольших дигрессий Меркурия, или его самых больших удалений в каждую сторону от Солнца, изменяется в пределах от 18 до 32$^g$ [от 16° до 29°]. Продолжительность этих полных колебаний Меркурия, или возвращений в то же положение относительно Солнца, изменяется соответственно в пределах от 106 до 130 суток. Средняя дуга обратного движения охватывает около 15$^g$ [13°], а средняя продолжительность этого движения равна 33 суткам, но в разные периоды эти значения сильно различаются между собой. В общем движение Меркурия очень сложно и происходит неточно в плоскости эклиптики. Иногда Меркурий отклоняется от нее больше, чем на 5$^g$ [4.°5].

Несомненно, потребовался длинный ряд наблюдений, чтобы распознать идентичность двух светил, которые поочередно были видны утром и вечером удаляющимися или приближающимися к Солнцу. Но так как одно из них никогда не появлялось, пока не исчезало другое, решили, наконец, что это одна и та же планета, совершающая колебания по обе стороны Солнца.

Видимый диаметр Меркурия непостоянен. Его изменения имеют очевидную связь с положением планеты относительно Солнца и направлением ее движения. Когда она утром погружается в солнечные лучи или появляется вечером, ее диаметр минимален. Когда она исчезает вечером в солнечных лучах или появляется утром, он максимален. Средняя величина видимого диаметра Меркурия равна 21.$^{cc}$3 [7″].

Иногда, в промежутке между вечерним исчезновением и утренним появлением Меркурия, можно видеть, как он проектируется на солнечный диск в виде черного пятна, движущегося по его хорде. Планету можно узнать по положению или по видимому диаметру, а также по возвратному движению, соответствующему тому, которое она должна иметь. Эти прохождения Меркурия являются настоящими кольцевыми затмениями

Солнца и доказывают нам, что он заимствует свой свет от Солнца. Рассматривая Меркурий в сильные телескопы, можно увидеть его фазы, аналогичные фазам Луны и таким же образом обращенные к Солнцу. Вид этих фаз изменяется в зависимости от положения планеты относительно Солнца и направления ее движения, что проливает яркий свет на свойства ее орбиты.

Венера представляет нам такие же явления, как и Меркурий, с той лишь разницей, что ее фазы гораздо более заметны, а колебания больше и продолжительнее. Наибольшие дигрессии Венеры варьируют в пределах от 50 до $53^g$ [от 45° до 48°], а средняя продолжительность колебаний, или возвращений в исходное положение, относительно Солнца равна 584 суткам. Возвратное движение начинается или кончается, когда планета, приближаясь к Солнцу или удаляясь от него утром, находится на угловом расстоянии около $32^g$ [29°]. Дуга обратного движения близка к $18^g$ [16°], и его средняя продолжительность равна 42 суткам. Обращение Венеры происходит не строго в плоскости эклиптики, от которой она отклоняется иногда на несколько градусов.

Продолжительности прохождений Венеры по солнечному диску, наблюденные из очень удаленных друг от друга точек на Земле, сильно различаются между собой по той причине, которая приводит к различной продолжительности одного и того же солнечного затмения в разных странах. Вследствие параллакса этой планеты различные наблюдатели относят ее к разным точкам солнечного диска, и она описывает хорды разной длины. Разность длительностей прохождения Венеры по солнечному диску в 1769 г., наблюденных в Отаити [Таити] в Южном море и в Каянебурге в шведской Лапландии, превысила 15 мин. Эти длительности могут быть определены с большой точностью, их разность дает очень точное значение параллакса Венеры, и, следовательно, ее расстояние от Земли в момент соединения.[3] Замечательный закон, который мы изложим в ходе открытий, позволивших его вывести, связывает этот параллакс с параллаксом Солнца и всех планет, что придает наблюдениям этих прохождений большое значение для астрономии. Повторившись с интервалом в 8 лет, прохождения не наступают затем более века, чтобы снова повториться с коротким восьмилетним интервалом, и т. д. Два последних прохождения произошли 5 июня 1761 г. и 3 июня 1769 г.[4] Астрономы разместились в наиболее благоприятных для наблюдения местах, и из совокупности всех их определений был выведен параллакс Солнца, равный $26.^{cc}54$ [8.″60] на среднем расстоянии от Земли. Два ближайших прохождения произойдут 8 декабря 1874 г. и 6 декабря 1882 г.

Большие изменения видимого диаметра Венеры доказывают нам, что ее расстояние от Земли очень сильно меняется. Оно меньше всего в момент прохождения Венеры по Солнцу, когда ее видимый диаметр равен приблизительно $189^{cc}$ [61″]. Средняя величина этого диаметра, по определениям Араго, равно $52.^{cc}173$ [16.″904].

Движение нескольких пятен на поверхности Венеры позволило Доминико Кассини определить период ее вращения. Он оказался чуть меньше одних суток. Шрётер путем наблюдения ее рогов, а также нескольких све-

тящихся точек около краев ее неосвещенной части подтвердил этот результат вызвавший некоторые сомнения. Он оценил период ее обращения в $0.^{d}973$ и нашел, так же как и Кассини, что экватор Венеры составляет с эклиптикой значительный угол. Наконец, из своих наблюдений он вывел существование очень высоких гор на ее поверхности и по закономерностям ослабления яркости при переходе от освещенной части к темной заключил, что эта планета окружена протяженной атмосферой, преломление которой мало отличается от преломления земной атмосферы. Исключительная трудность обнаружения этих явлений даже в самые сильные телескопы делает их наблюдение в нашем климате весьма сложным. Они заслуживают внимания наблюдателей, расположенных на юге, под небом, благоприятствующим наблюдениям. Но когда зрительные впечатления весьма слабы, очень важно оградить себя от игры воображения, которое может оказать на них большое влияние, так как внутренние образы, порожденные им, часто изменяют вид наблюдаемых объектов.

Своей яркостью Венера превосходит все другие планеты и звезды. Иногда она становится настолько яркой, что ее можно видеть среди дня невооруженным глазом. Этот феномен, зависящий от возвращения планеты к тому же положению относительно Солнца, повторяется с интервалом около 19 месяцев, а самая большая яркость наблюдается каждые 8 лет. Хотя это явление довольно частое, оно всегда вызывает удивление необразованных людей, которые по своему легковерному невежеству считают его связанным с наиболее замечательными современными им событиями.

## Глава VI

## О МАРСЕ

Обе рассмотренные нами планеты кажутся сопровождающими Солнце в качестве его спутников, и их среднее движение вокруг Земли такое же, как у него. Другие планеты удаляются от Солнца на любые угловые расстояния, но их движения имеют такие соотношения с солнечным, которые не позволяют сомневаться в его влиянии на эти движения.

Марс представляется нам движущимся вокруг Земли с запада на восток. Средняя продолжительность его сидерического обращения очень близка к 687 суткам, а синодического обращения, или его возвращения в начальное положение относительно Солнца, — к 780 суткам. Движение его крайне неравномерно. Когда мы начинаем видеть его по утрам выходящим из солнечных лучей, это движение прямое и наиболее быстрое. Затем оно понемному замедляется и, когда планета находится от Солнца на расстоянии $152^{g}$ [137°], становится равным нулю. Далее оно меняется на обратное, и его скорость возрастает до момента противостояния Марса с Солнцем. Скорость эта, достигнув максимума, начинает уменьшаться и становится равной нулю, когда Марс, приближаясь к Солнцу, оказывается от него на угловом расстоянии в $152^{g}$ [137°]. Обратное движение продолжается в течение 73 суток, за которые Марс описывает обратную

дугу около $18^g$ [16°]. Затем движение снова становится прямым, планета продолжает свое приближение к Солнцу и наконец вечером погружается в его лучи. Эти своеобразные явления возобновляются при каждом противостоянии Марса с довольно большими отклонениями в протяженности и продолжительности обратного движения.

Марс движется не строго в плоскости эклиптики и иногда отклоняется от нее на несколько градусов. Изменения его видимого диаметра очень велики. На среднем расстоянии до планеты он равен $19.^{cc}40$ [6.″29] и увеличивается по мере приближения к противостоянию, достигая $56.^{cc}43$ [18.″08]. В это время параллакс Марса становится ощутимым и делается примерно вдвое больше солнечного. Тот же закон, который связывает параллаксы Солнца и Венеры, равным образом имеет место для параллаксов Солнца и Марса, и наблюдения этого последнего уже позволили узнать приближенное значение параллакса Солнца раньше, чем произошли последние прохождения Венеры по диску Солнца, позволившие определить этот параллакс с большей точностью.

Можно заметить, что диск Марса изменяет свою форму и делается овальным в зависимости от положения относительно Солнца. Его фазы доказывают, что он получает свой свет от Солнца. Пятна, наблюдаемые на его поверхности, позволили определить, что он вращается с запада на восток с периодом в 1.02733 суток вокруг оси, наклоненной на $66.^g33$ [59.°70] к эклиптике. Его диаметр, измеренный в направлении полюсов, немного меньше, чем в направлении экватора. По измерениям Араго, эти диаметры относятся как 189 к 194, причем величина диаметра, приведенная выше, является средней из них.

## Глава VII

## О ЮПИТЕРЕ И ЕГО СПУТНИКАХ

Юпитер движется с запада на восток с периодом, очень близким к 4332.6 суток. Продолжительность его синодического обращения около 399 суток. Он подвержен неравенствам, подобным неравенствам Марса. Перед противостоянием этой планеты Солнцу, когда она удалена от него на угловое расстояние около $128^g$ [115°], ее движение делается обратным, убыстряется до момента противостояния, затем постепенно замедляется до нуля и снова делается прямым, когда планета, приближаясь к Солнцу, отстоит от него на $128^g$ [115°]. Длительность обратного движения составляет 121 сутки, а дуга этого движения равна $11^g$ [10°]. Однако в протяженности и продолжительности обратных движений Юпитера существуют значительные вариации. Движение этой планеты происходит не строго в плоскости эклиптики, от которой она отклоняется иногда на 3 или $4^g$.

На поверхности Юпитера наблюдается несколько темных полос, параллельных между собой и плоскости эклиптики. Наблюдаются еще и другие пятна, движение которых позволило установить вращение этой планеты с запада на восток вокруг оси, почти перпендикулярной эклип-

тике, с периодом в 0.41377 суток. Изменения некоторых из этих пятен и заметные различия в продолжительности вращения, выведенные из их движения, наводят на мысль, что они не жестко связаны с Юпитером. Представляется, что это облака, переносимые ветром с разными скоростями в очень неспокойной атмосфере.

После Венеры Юпитер самая яркая планета; иногда он даже превосходит ее блеском. Его видимый диаметр увеличивается до максимума во время противостояний и доходит до $141.^{cc}6$ [$45.''9$]. Среднее же его значение в направлении экватора равно $113.^{cc}4$ [$36.''7$]. Однако он неодинаков во всех направлениях. Планета заметно сжата у своих полюсов вращения, и путем очень точных измерений Араго нашел, что ее диаметр в направлении полюсов относится к экваториальному диаметру как 167 к 177.

Вокруг Юпитера наблюдаются четыре маленьких светила, которые его постоянно сопровождают. Их взаимное расположение непрерывно меняется, они как бы раскачиваются в обе стороны от планеты, и по полным протяженностям этих качаний определяют их порядок, называя *первым* тот из спутников, у которого размах качания наименьший. Иногда можно видеть, как они проходят по диску Юпитера и отбрасывают на него свою тень, которая описывает на этом диске хорду. Это говорит о том, что Юпитер и его спутники — непрозрачные тела, освещаемые Солнцем. Становясь между Солнцем и Юпитером, своими тенями спутники создают на этой планете настоящие затмения Солнца, вполне похожие на те, которые создает Луна на Земле.

Тень, которую Юпитер отбрасывает позади себя (относительно Солнца), объясняет другой феномен, являемый спутниками. Часто можно видеть, что они исчезают несмотря на то, что до диска планеты еще далеко. Третий и четвертый иногда появляются вновь по ту же сторону от этого диска. Эти исчезновения полностью похожи на затмения Луны, и сопровождающие их обстоятельства не оставляют в этом никакого сомнения. Исчезновение спутников происходит всегда со стороны диска Юпитера, противоположной Солнцу и, следовательно, с той стороны, где находится отбрасываемый им конус тени. Они затмеваются ближе к диску Юпитера, когда планета находится ближе к своему противостоянию. Наконец, длительность их затмений в точности соответствует времени, которое они должны затратить для пересечения теневого конуса. Следовательно, спутники обращаются с запада на восток вокруг этой планеты.

Наблюдения затмений спутников дают наиболее верный способ изучения их движений. Сравнивая затмения, разделенные большими промежутками времени и наблюденные вблизи противостояния планеты, с высокой точностью получают сидерический и синодический периоды обращения спутников вокруг Юпитера. Таким путем было найдено, что движение спутников Юпитера почти круговое и равномерное. Так как эта гипотеза приблизительно удовлетворяет затмениям, в которых мы видим эту планету в одинаковых положениях относительно Солнца, в любое время можно предопределить положение спутников, видимое из центра Юпитера.

Отсюда вытекает простой и довольно точный метод сравнения между собой расстояний от Юпитера и Солнца до Земли, метод, которого не хватало древним астрономам. Так как параллакс Юпитера неощутим даже при точности современных наблюдений и в то время, когда он ближе всего к нам, они судили о его отдаленности только по продолжительности обращения, полагая более удаленными планеты, имеющие более длительный период обращения.

Предположим, что была наблюдена полная продолжительность затмения третьего спутника. В середине затмения спутник, видимый из центра Юпитера, находился весьма точно в противостоянии с Солнцем. Его положение среди звезд, видимое из этого центра и легко выводимое из движения Юпитера и его спутников, было тем же, что и положение центра Юпитера, видимого из центра Солнца. Непосредственное наблюдение или известное нам движение Солнца дают положение Земли, видимой из центра этого светила. Таким образом, из треугольника, образованного прямыми, соединяющими центры Солнца, Юпитера и Земли, получим угол при Солнце. Непосредственное измерение дает нам угол при Земле, что позволяет получить на момент середины затмения расстояния по прямой от Юпитера до Земли и Солнца в долях расстояния от Солнца до Земли. Таким способом было найдено, что когда видимый диаметр Юпитера равен 113.$^{cc}$4 [36.$''$7], он находится, по крайней мере, в пять раз дальше от нас, чем Солнце. На таком же расстоянии диаметр Земли был бы виден под углом лишь в 10.$^{cc}$4 [3.$''$4]. Значит, объем Юпитера, по крайней мере, в тысячу раз больше объема Земли.

Видимые диаметры спутников Юпитера столь малы, что нельзя точно измерить их величины. Были сделаны попытки оценить размеры спутников через время, затрачиваемое ими для проникновения в тень планеты. Но наблюдения дают большие расхождения в оценках из-за разницы в силе телескопов и в зрении наблюдателей, из-за различий в состоянии атмосферы, в высоте спутников над горизонтом, в их видимом расстоянии от Юпитера и в обращенных к нам полусферах. Сравнение блеска спутников не зависит от первых четырех из указанных причин, которые лишь пропорционально изменяют их светимость. Поэтому оно может дать нам сведения о возвращении пятен, которое вызывается вращением этих тел, и, следовательно, о самом этом движении. Гершель, занимавшийся этими тонкими исследованиями, обнаружил, что спутники попеременно превосходят друг друга по яркости, — обстоятельство, очень подходящее для суждения о максимуме и минимуме их светимости. Сравнивая эти максимумы и минимумы с взаимными положениями этих светил, он нашел, что они вращаются вокруг самих себя как Луна, за время, равное продолжительности их оборота вокруг Юпитера. Для четвертого спутника этот результат был уже ранее получен Маральди по расположению одного и того же пятна, наблюдавшегося во время его прохождений по диску. Большая отдаленность небесных тел ослабляет явления, представляемые их поверхностью, до такой степени, что сводит их к очень малым изменениям светимости, которые ускользают от первого взгляда, и только долгие упражнения в наблюдениях такого рода делают их замет-

ными. Поэтому не следует применять этот способ, на который так сильно влияет воображение, иначе как с исключительной осмотрительностью, чтобы не ошибиться относительно существования этих изменений и не впасть в заблуждение, рассуждая о причинах, от которых они зависят.

## Глава VIII

### О САТУРНЕ, О ЕГО СПУТНИКАХ И ЕГО КОЛЬЦЕ

Сатурн движется с запада на восток с периодом в 10 759 суток. Продолжительность его синодического обращения равна 378 суткам. Его движение, происходящее очень близко к плоскости эклиптики, подчинено неравенствам, похожим на неравенства в движениях Марса и Юпитера. Его движение делается обратным или перестает им быть, когда планета перед или после противостояния находится на удалении от Солнца в $121^g$ [109°]. Длительность обратного движения около 139 суток, а длина пути приблизительно равна $7^g$ [6°]. В момент противостояния видимый диаметр Сатурна максимален, а его средняя величина близка к $50^{cc}$ [16″].

В системе мира Сатурн представляется уникальным в своем роде. Часто его можно увидеть посредине между двумя маленькими телами, которые кажутся примыкающими к нему; их форма и размеры очень изменчивы. Иногда они превращаются в кольцо, которое кажется окружающим планету, в другое время они полностью исчезают, и тогда Сатурн выглядит круглым, как и другие планеты. Тщательно следя за этими странными видоизменениями и сопоставляя их с положениями Сатурна относительно Солнца и Земли, Гюйгенс обнаружил, что они вызываются широким и тонким кольцом, окружающим Сатурн и всюду отделенным от него. Это кольцо, наклоненное под углом $31.^g85$ [$28.^o67$] к плоскости эклиптики, с Земли видно всегда только наклонно в виде эллипса, самая большая ширина которого равна приблизительно половине длины. Эллипс суживается все больше и больше по мере того, как луч зрения, проведенный от Сатурна к Земле, опускается к плоскости кольца, причем его задняя дуга наконец скрывается за планетой, а передняя сливается с ней. Но его тень, проектирующаяся на диск Сатурна, образует темную полосу, которая видна в сильные телескопы, и доказывает, что Сатурн и его кольцо — непрозрачные тела, освещаемые Солнцем. Тогда можно различить лишь части кольца, выступающие с каждой стороны Сатурна. Толщина этих частей постепенно уменьшается, и они наконец исчезают, когда Земля оказывается в плоскости кольца, толщина которого слишком мала, чтобы ее можно было увидеть. Кольцо исчезает еще в том случае, когда Солнце, оказавшись в его плоскости, освещает его только с ребра. Оно продолжает быть невидимым, пока его плоскость проходит между Солнцем и Землей, и появляется снова только тогда, когда в силу взаимных движений Сатурна и Солнца Земля и Солнце оказываются по одну сторону от той плоскости.

Так как плоскость кольца встречается с солнечной орбитой в каждый полупериод обращения Сатурна, исчезновение и появление кольца повторяются приблизительно через каждые 15 лет, но часто при разных обстоятельствах. В одном и том же году могут случиться два появления и два исчезновения кольца, но никогда больше.

Во время исчезновения кольца его ребро отражает к нам солнечный свет, но он слишком слаб, чтобы быть заметным. Однако понятно, что для его наблюдения достаточно увеличить силу телескопов. Именно это сделал Гершель: он не переставал видеть его, в то время как оно было невидимым для других наблюдателей.

Наклонность кольца к эклиптике измеряется наибольшим раскрытием видимого нами эллипса. Положение его узлов на плоскости эклиптики легко выводится из положения Сатурна, когда появление или исчезновение кольца зависит от встречи его плоскости с Землей. Все явления такого рода, происходящие при одинаковых сидерических положениях узлов, обусловлены этой встречей. Другие происходят при встрече этой плоскости с Солнцем. Поэтому по положению Сатурна в моменты, когда кольцо появляется или исчезает, можно определить, зависит ли это от встречи его плоскости с Солнцем или с Землей. Когда эта плоскость проходит через Солнце, положение узлов дает положение Сатурна, видимого из центра Солнца, и тогда можно определить расстояние по прямой от Сатурна до Земли так, как определяется расстояние до Юпитера с помощью наблюдения затмений его спутников. В треугольнике, образованном тремя прямыми, соединяющими центры Солнца, Сатурна и Земли, имеем углы при Земле и Солнце, откуда легко вывести расстояние от Солнца до Сатурна в долях радиуса солнечной орбиты. Таким способом находим, что Сатурн, когда его видимый диаметр равен $50^{cc}$ [16″], приблизительно в девять с половиной раз дальше от нас, чем Солнце.

Видимый диаметр кольца при среднем расстоянии до планеты, по точным измерениям Араго, равен $118.^{cc}58$ [38.″42]. Видимая ширина кольца $17.^{cc}858$ [5.″786]. Его поверхность не сплошная. Черная концентрическая полоса разделяет его на две части, которые, по-видимому, образуют два разных кольца, из которых внешнее у́же внутреннего. Несколько черных полос, замеченных некоторыми наблюдателями, как будто даже указывают на большее число этих колец. Наблюдение нескольких блестящих точек на кольце позволило Гершелю узнать, что оно вращается с запада на восток с периодом в 0.437 суток вокруг оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр Сатурна.

Вокруг этой планеты видны семь спутников, движущихся с запада на восток по почти круговым орбитам. Шесть первых движутся почти в плоскости кольца. Орбита седьмого ближе к плоскости эклиптики. Когда этот спутник находится к востоку от Сатурна, его яркость ослабляется настолько, что он делается едва различимым. Это может происходить только из-за пятен, покрывающих ту полусферу, которая обращена к нам. Но для постоянного повторения этого явления при том же положении необходимо, чтобы этот спутник, похожий в этом на Луну и на спутники Юпитера, вращался вокруг своей оси за время, равное его об-

ращению вокруг Сатурна. Таким образом, равенство продолжительности вращения и обращения представляется общим законом движения спутников.

Диаметры Сатурна не равны между собой: тот, который перпендикулярен плоскости кольца по крайней мере на 1/11 короче диаметра, лежащего в его плоскости. Сравнивая это сжатие с сжатием Юпитера, можно с большой долей вероятности заключить, что Сатурн быстро вращается вокруг меньшего из своих диаметров и что кольцо движется в плоскости его экватора. Гершель подтвердил этот вывод путем непосредственных наблюдений, которые показали, что вращение Сатурна, как и все движения планетной системы, направлено с запада на восток, и продолжительность одного оборота равна 0.428 суток, что мало отличается от времени вращения Юпитера. Замечательно, что время оборота этих двух самых больших планет почти одинаково, оно меньше половины суток, тогда как меньшие планеты вращаются с периодом, очень близким к одним суткам.

Гершель наблюдал еще на поверхности Сатурна пять полос, приблизительно параллельных его экватору.

## Глава IX

### ОБ УРАНЕ И ЕГО СПУТНИКАХ

Планета Уран из-за своей малости ускользнула от древних астрономов. Флемстид в конце позапрошлого века, Майер и Лемонье в прошлом веке уже наблюдали ее как маленькую звезду. Но только в 1781 г. Гершель обнаружил ее движение, и немного позже, тщательно следя за этим светилом, установили, что это настоящая планета. Как Марс, Юпитер и Сатурн, Уран движется с запада на восток вокруг Земли. Время его сидерического обращения около 30 687 суток. Его движение, которое происходит весьма близко к плоскости эклиптики, становится попятным, когда перед противостоянием планета находится на расстоянии $115^g$ [104°] от Солнца. Оно перестает быть таким, когда после противостояния планета, приближаясь к Солнцу, удалена от него не более чем на $115^g$ [104°]. Продолжительность обратного движения около 151 суток, и дуга его равна $4^g$.

Если судить об удаленности Урана по медленности его движения, он должен быть на границе планетной системы. Его видимый диаметр очень мал и едва достигает $12^{cc}$ [4″]. По наблюдениям Гершеля, вокруг него движутся шесть спутников по почти круговым орбитам, приблизительно перпендикулярным к плоскости эклиптики. Чтобы их обнаружить, необходимы очень сильные телескопы. Только два из них — второй и четвертый — были опознаны другими наблюдателями. Опубликованные Гершелем наблюдения над остальными четырьмя спутниками слишком малочисленны, чтобы определить элементы их орбит и даже бесспорно подтвердить их существование.[5]

## Глава X

## О ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ ПЛАНЕТАХ ЦЕРЕРЕ, ПАЛЛАДЕ, ЮНОНЕ И ВЕСТЕ

Эти четыре планеты так малы, что их можно увидеть только в сильные телескопы. Первый день этого века замечателен открытием планеты Цереры, сделанным Пиацци в Палермо. Паллада была обнаружена в 1802 г. Ольберсом, Юнону в 1803 г. открыл Хардинг и, наконец, в 1807 г. Ольберс заметил Весту. Как и у других планет, движение этих светил происходит с запада на восток; они также движутся попеременно в прямом и обратном направлениях, но недостаточность времени, прошедшего с их открытия, не позволяет с точностью установить продолжительность их обращения и законы движения. Известно только, что периоды их сидерических обращений близки между собой и у первых трех приблизительно равны 4 годам с двумя третями, а продолжительность обращения Весты представляется на год более короткой.

Паллада может удаляться от плоскости эклиптики гораздо больше, чем планеты, известные с древности, и чтобы охватить это отклонение, надо значительно расширить Зодиак.[6]

## Глава XI

## О ДВИЖЕНИИ ПЛАНЕТ ВОКРУГ СОЛНЦА

Если бы человек ограничился лишь собиранием фактов, наука была бы только их бесплодным перечнем, и никогда не смог бы он познать великие законы природы. Сравнивая факты между собой, постигая их взаимоотношения и восходя таким путем ко все более и более обширным явлениям, он наконец пришел к открытию этих законов, запечатленных в их самых разнообразных проявлениях. Раскрываясь, природа показала человеку небольшое число причин, рождающих множество наблюдавшихся им явлений, и он смог определить, что еще они должны произвести. Когда он убедился, что ничто не нарушает связь причин и их проявлений, он обратил взгляды в будущее, и перед его взором предстали те явления, которые природа произведет со временем.

До сих пор только в теории системы мира после длинного ряда счастливых усилий человеческий разум поднялся до такой высоты. Первая гипотеза, придуманная для объяснения видимых планетных движений, оказалась только несовершенным эскизом этой теории. Но искусным образом представив видимые явления, она сделала их доступными для расчетов, и мы увидим, что, подвергнувшись изменениям, которые одно за другим диктовались наблюдениями, она превратилась в истинную систему мира.

Самое замечательное из того, что являют нам движения планет, — это смена их прямых и обратных движений, которая может быть только результатом сложения двух движений, попеременно то совпадающих, то

противоположных по направлению. Наиболее естественная гипотеза для их объяснения была придумана древними астрономами. Она заключалась в том, что три верхние планеты они предполагали движущимися в прямом направлении по эпициклам, центры которых в том же направлении описывают окружности вокруг Земли. Тогда если рассматривать планету в самой низкой точке ее эпицикла, или самой близкой к Земле, ясно, что она в этом положении движется в сторону, противоположную движению эпицикла, который всегда переносится параллельно самому себе. Поэтому если предположить, что первое из этих движений превалирует над вторым, видимое движение планеты будет попятным и максимальным. Напротив, если планета находится в самой высокой точке эпицикла, оба движения совпадают, и видимое движение оказывается прямым и наибольшим. Идя от первого из этих положений ко второму, можно считать, что планета продолжает иметь обратное видимое движение, которое непрерывно уменьшается, становится равным нулю и затем превращается в прямое. Но наблюдения показывают, что максимальное обратное движение всегда имеет место в моменты противостояния планеты с Солнцем. Поэтому необходимо, чтобы каждый эпицикл описывался за время, равное времени обращения этого светила, и чтобы планета оказывалась в своей самой низшей точке во время противостояния с Солнцем. Из этого понятно, почему во время противостояния видимый диаметр планеты максимален. Что касается двух нижних планет, которые никогда не отдаляются от Солнца дальше некоторого предела, то их попеременно прямое и обратное движения можно объяснить, предположив, что они движутся в прямом направлении по эпициклам, центры которых описывают каждый год, и в том же направлении окружности вокруг Земли и, кроме того, в тот момент, когда планеты достигают самой нижней точки своего эпицикла, они оказываются в соединении с Солнцем. Такова наиболее древняя астрономическая гипотеза, принятая и улучшенная Птолемеем и получившая имя этого астронома.

В этой гипотезе ничто не указывает на абсолютные величины кругов и эпициклов. То, что мы видим, дает только отношения их радиусов. По-видимому, Птолемей не занимался также определением относительных расстояний от планет до Земли. Он только полагал, что верхние планеты, у которых период обращения более длинный, находятся дальше; затем он помещал под Солнцем эпицикл Венеры и еще ниже эпицикл Меркурия. При столь неопределенной гипотезе неясно, почему дуги обратного движения верхних планет тем меньше, чем они дальше удалены, и почему подвижные радиусы верхних эпициклов постоянно параллельны радиусу-вектору Солнца и подвижным радиусам двух нижних кругов. Этот параллелизм, который был введен в гипотезу Птолемея уже Кеплером, ясно проявляется во всех наблюдениях движения планет, параллельного и перпендикулярного эклиптике. Но причина этих явлений делается очевидной, если считать эти эпициклы и круги равными солнечной орбите. Легко убедиться, что рассматриваемая гипотеза, измененная таким образом, сводится к предположению о том, что все планеты обращаются вокруг Солнца, которое в своем истинном или види-

мом движении вокруг Земли уносит центры их орбит. Такое простое расположение планет в системе не оставляет больше ничего неопределенного и с очевидностью доказывает связь прямых и обратных движений планет с движением Солнца. Оно исключает из гипотезы Птолемея круги и эпициклы, ежегодно описываемые планетами, а также те, которые он ввел для объяснения их движений перпендикулярно к эклиптике. Соотношения, которые вывел этот астроном между радиусами двух нижних эпициклов и радиусами кругов, описываемых их центрами, выражают теперь средние расстояния планет от Солнца в долях среднего расстояния от Солнца до Земли. Эти же соотношения, обратные для верхних планет, выражают их средние расстояния от Солнца или от Земли. Простоты этой гипотезы было бы уже достаточно, чтобы ее принять, однако наблюдения с телескопами не оставляют никаких сомнений в этом отношении.

Мы уже видели, что затмения спутников Юпитера позволяют определить расстояние этой планеты от Солнца, и из этих определений вытекает, что она описывает вокруг него почти круговую орбиту. Мы видели также, что появления и исчезновения кольца Сатурна дают нам его расстояние до Земли — приблизительно в девять с половиной раз большее, чем расстояние от Земли до Солнца. Это соотношение весьма близко к выведенному Птолемеем отношению радиуса орбиты Сатурна к радиусу его эпицикла. Отсюда следует, что этот эпицикл равен солнечной орбите, и, таким образом, Сатурн описывает почти правильный круг вокруг Солнца. Фазы, наблюдаемые у двух нижних планет, с очевидностью доказывают, что планеты движутся вокруг Солнца. В самом деле, проследим движение Венеры и изменение ее видимого диаметра и фаз. Когда по утрам планета начинает выходить из солнечных лучей, она появляется до восхода Солнца в виде серпа, ее видимый диаметр максимален. Значит, она ближе к нам, чем Солнце, и почти в соединении с ним. Ее серп увеличивается, а видимый диаметр уменьшается по мере того, как она удаляется от Солнца. Отойдя приблизительно на $50^g$ [45°] от этого светила, она начинает приближаться к нему, все больше открывая нам освещенное полушарие; ее видимый диаметр продолжает уменьшаться до тех пор, пока она не погрузится утром в солнечные лучи. В этот момент Венера представляется нам полной, а ее видимый диаметр минимальным. Следовательно, в этом положении она дальше от нас, чем от Солнца. Исчезнув на некоторое время, эта планета вновь появляется вечером и повторяет в обратном порядке все явления, которые она демонстрировала перед исчезновением. Ее освещенное полушарие все больше и больше отворачивается от Земли, ее фазы уменьшаются, и в то же время видимый диаметр увеличивается по мере ее удаления от Солнца. Достигнув расстояния около $50^g$ [45°] от этого светила, она снова возвращается к нему. Ее фазы продолжают уменьшаться, а диаметр увеличиваться до тех пор, пока она снова не погрузится в солнечные лучи. Иногда, в интервале между ее вечерним исчезновением и утренним появлением, можно увидеть ее в виде пятна, движущегося по диску Солнца. Из этих явлений ясно, что Солнце на-

ходится почти в центре орбиты Венеры, которую оно уносит одновременно со своим движением вокруг Земли. Меркурий показывает нам явления, подобные описанным, и, таким образом, Солнце находится также в центре его орбиты.

Итак, видимые движения планет и изменения их фаз приводят нас к общему выводу, а именно, что *«все эти светила движутся вокруг Солнца, которое в своем истинном или видимом обращении вокруг Земли как будто уносит фокусы их орбит»*. Примечательно, что этот вывод вытекает из гипотезы Птолемея, если окружности и эпициклы, каждый год описываемые в соответствии с этой гипотезой, положить равными солнечной орбите. При таком предположении гипотеза перестает быть чисто идеальной и годной единственно для представления в воображении небесных движений. Вместо того, чтобы предполагать планеты обращающимися вокруг воображаемых центров, помещаем в фокусе их орбит большие тела, которые своим воздействием могут удерживать их на своих орбитах, и, таким образом, постигаем причины круговых движений.

## Глава XII

## О КОМЕТАХ

Часто можно заметить светила, которые сперва едва видны, затем увеличивают свою яркость и скорость движения, потом снова уменьшают их и наконец исчезают из вида. Эти светила называются *кометами*. Почти всегда комета сопровождается туманностью, которая, разрастаясь, иногда оканчивается очень протяженным хвостом; этот хвост должен быть крайне разреженным, поскольку через его необъятную глубину видны звезды. Появление комет, сопровождаемых этими длинными шлейфами света, долгое время пугало людей, которых всегда потрясают необычайные события, если их причины неизвестны. Свет науки рассеял эти напрасные страхи, которые в века невежества внушали кометы, затмения и многие другие явления.

Кометы, как и все светила, участвуют в суточном движении неба, и это, вместе с малостью их параллаксов, показывает, что они не являются метеорами, порожденными в нашей атмосфере. Их собственные движения очень сложны. Кометы двигаются во всех направлениях и не придерживаются, как планеты, направления с запада на восток и плоскостей, мало наклоненных к эклиптике.

## Глава XIII

## О ЗВЕЗДАХ И ИХ ДВИЖЕНИЯХ

Параллаксы звезд неощутимы; их диски, рассматриваемые в самые сильные телескопы, сводятся к светящимся точкам, чем эти светила отличаются от планет, у которых телескоп увеличивает видимые раз-

меры. Малость видимого диаметра звезд доказывается, в особенности тем, сколь малое время они затрачивают на исчезновение при покрытии их Луной. Это время, не превышающее секунды, указывает, что этот диаметр меньше $5^{cc}$ дуги [1.″6]. Яркость света самых блестящих звезд в сравнении с их малостью заставляет считать, что они гораздо дальше удалены от нас, чем планеты, и не занимают, как последние, свой свет у Солнца, но светятся сами, а так как даже самые слабые звезды подвержены тем же движениям, что и самые яркие, и сохраняют постоянное взаимное положение, очень вероятно, что все эти светила одной природы и что это — светящиеся тела большего или меньшего размера, расположенные дальше или ближе, но за пределами солнечной системы.

У некоторых звезд наблюдаются периодические изменения интенсивности света, отчего они и названы *переменными*. Иногда были видны звезды, появляющиеся почти внезапно и после периода яркого блеска исчезающие. Такой была знаменитая звезда, наблюдавшаяся в 1572 г. в созвездии Кассиопеи. За короткое время она достигла яркости, превышающей яркость самых прекрасных звезд и даже Юпитера. Затем ее свет ослабел, и через 16 месяцев после ее открытия она исчезла, не изменив своего положения на небе. Ее цвет претерпел значительные изменения. Сперва она была ослепительно белой, затем стала красновато-желтой и наконец свинцово-белой. Какова причина этих явлений? Очень протяженные пятна, которые периодически обращают к нам переменные звезды, вращаясь вокруг самих себя, подобно последнему спутнику Сатурна, или, может быть, прохождение больших непрозрачных тел, обращающихся вокруг этих звезд, объясняют периодические изменения блеска. Что же касается внезапно появляющихся звезд с очень ярким светом и затем исчезающих, то можно сделать правдоподобное предположение, что это — большие пожары, случившиеся по экстраординарным причинам на их поверхности. Это предположение подтверждается изменением их цвета, аналогичным тому, которое мы видим на Земле при воспламенении и сгорании тел.

Белое свечение неправильной формы, которому дали название *Млечного пути*, окружает небо в виде пояса. С помощью телескопа можно увидеть, что это — огромное множество слабых звезд, которые представляются нам столь сближенными, что их совокупность образует сплошное сияние. В разных частях неба можно увидеть еще маленькие белесые пятна, названные *туманностями*. Некоторые из них, по-видимому, той же природы, что и Млечный путь. В телескоп видно, что они также представляют собой скопления большого числа звезд. Другие видны только как сплошное белое сияние. Очень вероятно, что они образованы из светящейся очень разреженной материи, рассеянной в небесном пространстве в виде различных скоплений, постепенная конденсация которых образовала звезды во всем их разнообразии. Замечательные изменения, наблюденные в некоторых туманностях, и в особенности в прекрасной туманности Ориона, хорошо объясняются этой гипотезой и придают ей большую вероятность.

Взаимная неподвижность звезд побудила астрономов относить к ним, как к неподвижным точкам, собственные движения других небесных тел. Для этого их нужно было классифицировать, чтобы можно было их узнавать. С этой целью звездное небо было разделено на группы звезд, названные *созвездиями.* Необходимо было еще иметь точные положения звезд на небесной сфере, и вот как этого достигли.

Вообразим большой круг, проходящий через полюса мира и через центр какого-нибудь светила, называемый *кругом склонений* и пересекающий экватор под прямым углом. Дуга этого круга, заключенная между экватором и центром светила, измеряет его склонение — северное или южное в зависимости от наименования полюса, к которому она ближе.

Для всех светил, расположенных на одной параллели и имеющих одинаковые *склонения,* необходимо иметь еще один элемент, чтобы определить их положение. Для этого выбрали дугу экватора, заключенную между кругом склонений и точкой весеннего равноденствия. Эта дуга, отсчитываемая от точки равноденствия в направлении собственного движения Солнца, т. е. с запада на восток, называется *прямым восхождением.* Таким образом, положение светил определяется их прямым восхождением и склонением.

Сравнение меридианной высоты светила с высотой полюса дает расстояние этого светила от экватора, или его *склонение.*[7] Определение его прямого восхождения для древних астрономов представляло большие трудности из-за невозможности непосредственно сравнивать положения звезд и Солнца. Чтобы определить прямые восхождения звезд, они пользовались Луной как промежуточным звеном для измерения разности ее прямого восхождения днем — с Солнцем, а ночью — со звездами, и учитывали собственные движения Луны и Солнца за интервал между наблюдениями. Получив из теории прямое восхождение Солнца, они выводили прямые восхождения некоторых главных звезд, к которым относили остальные. Таким способом Гиппарх составил первый каталог звезд, о котором мы знаем. Много позже этот метод был уточнен благодаря использованию вместо Луны планеты Венеры, которую иногда можно видеть в середине дня и движение которой в коротких промежутках времени медленнее и не так неравномерно, как лунное. В наши дни, когда применение маятниковых часов позволяет измерять время очень точно, мы можем непосредственно и значительно точнее, чем древние астрономы, определить разность прямых восхождений звезд и Солнца по времени, протекшему между их прохождениями через меридиан.

Подобным же образом можно относить положения звезд к эклиптике, что особенно полезно в теории Луны и планет. Воображают большой круг, проходящий через центр светила перпендикулярно к плоскости эклиптики; этот круг называют *кругом широты.* Дуга этого круга, заключенная между эклиптикой и светилом, измеряет его *широту,* северную или южную, в зависимости от наименования полюса, расположенного с той же стороны эклиптики. Дуга эклиптики между кругом

широты и точкой весеннего равноденствия, отсчитываемая с запада на восток от этой точки, называется *долготой светила*, положение которого, таким образом, определяется его долготой и широтой. Легко понять, что если известна наклонность экватора к эклиптике, долготы и широты светил могут быть выведены из наблюденных значений их прямых восхождений и склонений.

Понадобилось немного лет, чтобы обнаружить изменения в прямых восхождениях и склонениях звезд. Вскоре было замечено, что, меняя положение относительно экватора, они сохраняли ту же широту; из этого вывели, что изменения их прямых восхождений и склонений вызваны общим движением этих звезд вокруг полюсов эклиптики. Эти изменения можно еще представить иначе, полагая звезды неподвижными и заставляя двигаться вокруг этих полюсов полюса экватора. В этом движении наклонность экватора к эклиптике остается неизменной, а узлы, или точки равноденствий, равномерно отступают на $154.^{cc}63$ [$50.''10$] в год. Раньше мы уже видели, что это отступление точек равноденствия делает тропический год немного короче звездного. Таким образом, разница обоих годов, звездного и тропического, и изменения прямых восхождений и склонений звезд зависят от этого движения, из-за которого полюс экватора описывает ежегодно дугу в $154.^{cc}63$ [$50.''10$] маленького круга на небесной сфере, параллельного плоскости эклиптики. Именно в этом и заключается явление, известное под названием *прецессии равноденствий.*

Точность, которой современная астрономия обязана применению оптических труб в астрономических инструментах и часам с маятником, позволила обнаружить небольшие периодические неравенства в наклонении экватора к эклиптике и в прецессии равноденствий. Брадлей, который открыл их и с исключительной тщательностью следил за ними в течение многих лет, вывел закон, который может быть представлен следующим образом.

Вообразим полюс экватора движущимся по периметру малого эллипса, касательного к небесной сфере, с центром, который можно рассматривать как средний полюс экватора. Этот центр каждый год равномерно описывает $154.^{cc}63$ [$50.''10$] параллели к эклиптике, на которой он расположен. Большая ось этого эллипса находится всегда в плоскости круга широты и соответствует дуге этого большого круга в $59.^{cc}56$ [$19.''30$], а малая ось соответствует дуге в $111.^{cc}30$ [$36.''06$] его параллели. Положение истинного полюса экватора на этом эллипсе определяется так: в плоскости эллипса воображают маленькую окружность с тем же центром и с диаметром, равным большой оси. Положим, что радиус этого круга движется равномерно в попятном направлении так, что он совпадает с той половиной большой оси, которая ближе к эклиптике, всякий раз, когда средний восходящий узел лунной орбиты совпадает с точкой весеннего равноденствия. Далее из конца этого подвижного радиуса опустим перпендикуляр на большую ось эллипса. Точка, в которой этот перпендикуляр пересечет эллипс, и есть место истинного полюса экватора. Это движение полюса называется *нутацией.*

При описанных выше движениях взаимные положения звезд сохраняются. Но великий наблюдатель,* которому мы обязаны открытием нутации, обнаружил у всех этих светил общее периодическое движение, которое немного изменяет их взаимное расположение. Чтобы представить себе это движение, надо вообразить, что каждая звезда ежегодно описывает маленькую параллельную эклиптике окружность, центр которой соответствует среднему положению звезды, а диаметр, видимый с Земли, равен $125^{cc}$ [40.″5], и что звезда движется по этой окружности, как Солнце по своей орбите, однако так, что Солнце всегда опережает ее на $100^{g}$ [90°]. Эта окружность проектируется на поверхность неба в виде эллипса, большее или меньшее сжатие которого зависит от высоты звезды над эклиптикой, причем малый радиус его относится к большому как синус этой высоты к радиусу. Отсюда происходят все изменения этого периодического движения звезд, называемого *аберрацией*.

Независимо от этих общих движений, некоторые звезды имеют собственные очень медленные, но с течением времени ставшие заметными движения. Они до сих пор были заметны главным образом у Сириуса и Арктура — двух из наиболее ярких звезд. Но все приводит к мысли, что будущие века обнаружат подобные движения и у других звезд.[8]

## Глава XIV

### О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ, ОБ ИЗМЕНЕНИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ И О ДЕСЯТИЧНОЙ СИСТЕМЕ МЕР И ВЕСОВ

Вернемся с неба на Землю и посмотрим, что узнали мы из наблюдений о ее размерах и фигуре, которая, как мы уже видели, очень близка к сферической. Сила тяжести, везде направленная к ее центру, удерживает тела на ее поверхности, хотя в диаметрально противоположных точках, или у антиподов, они имеют противоположные положения. Небо и звезды всегда видны над Землей, так как понятия подъема или опускания относятся только к направлению силы тяжести.

С того момента, когда человек узнал о сферичности Земли, на которой он живет, любопытство побуждало его измерить ее размеры. Поэтому очень вероятно, что первые такие попытки относятся к временам, гораздо более древним, чем те, о которых история сохранила нам сведения, и что их результаты были утеряны во время физических и моральных потрясений, перенесенных Землей. Отношения многих мер, употреблявшихся в глубокой древности, как между собой, так и к длине земной окружности, заставляют подозревать, что в очень древние времена эта длина была не только хорошо известна, но и служила основой для совершенной системы мер, следы которой находят в Египте и в Азии.[9] Как бы то ни было, первое точное измерение Земли, о котором мы имеем достоверные сведения, было выполнено Пикаром во Франции

* Имеется в виду Брадлей (Прим. перев.).

в конце позапрошлого века и затем несколько раз проверялось. Принцип этого измерения легко понять. Перемещаясь к северу, мы видим, что полюс все больше и больше поднимается: меридианная высота звезд, расположенных на севере, увеличивается, а у звезд, расположенных на юге, уменьшается. Некоторые из них даже делаются невидимыми. Первые понятия о кривизне Земли несомненно обязаны наблюдениям этих явлений, которые не могли не обратить на себя внимание людей в первые века существования человеческих обществ, когда сезоны и их возвращения различали лишь по восходу и заходу главных звезд, сравнивая их с восходами и заходами Солнца. Возвышение или понижение звезд позволяет определить угол, который образуют в точке своего пересечения отвесные линии, восставленные на концах проведенной по Земле дуги, так как этот угол, очевидно, равен разности меридианных высот одной и той же звезды без угла, под которым был бы виден из центра этой звезды пройденный путь, а этот последний угол, как в этом убедились, неощутимо мал. После этого остается только измерить этот пройденный путь, но было бы долго и трудно применять наши обычные способы измерения к такому большому расстоянию. Гораздо проще связать его концы цепью треугольников с базой в 12 000—15 000 м и, учитывая точность, с которой можно определить углы этих треугольников, получить очень точно его длину. Таким образом была измерена дуга земного меридиана, пересекающего Францию. Равная 1/100 прямого угла, часть этой дуги, середина которой соответствует высоте полюса в $50^g$ [45°], почти в точности равна 100 000 м.

Из всех замкнутых фигур сферическая фигура самая простая, так как зависит только от одного элемента — величины своего радиуса. Естественная склонность человеческого мышления предполагать в предметах форму, которую ему легче всего понять, привела его к мысли придать Земле сферическую форму. Но простота природы не должна всегда соразмеряться с простотой наших представлений. Бесконечно разнообразная в своих проявлениях, она проста только в своих причинах, и ее экономность состоит в том, чтобы производить большое число явлений, иногда очень сложных, с помощью небольшого числа общих законов. Фигура Земли есть один из результатов действия этих законов, которые, модифицированные тысячей обстоятельств, могут заметно отклонить ее от сферы. Небольшие вариации, наблюдавшиеся во время градусных измерений во Франции, указывали на эти отклонения. Но неизбежные ошибки наблюдений заставляли сомневаться в этом интересном явлении, и Академия наук, в которой этот важный вопрос живо обсуждался, разумно решила, что различие земных градусов, если оно реально, должно обнаружиться главным образом при сравнении градусов, измеренных на экваторе и вблизи полюсов. Она послала академиков на самый экватор, и они нашли, что там градус меридиана меньше, чем во Франции. Другие академики отправились на север и обнаружили, что там градус больше.[10] Таким образом, увеличение градусов меридиана от экватора к полюсу было неопровержимо доказано этими измерениями, и в результате был сделан вывод, что Земля не строго сферична.

Эти знаменитые экспедиции французских академиков привлекли внимание наблюдателей к исследуемому предмету, и в Италии, Германии, в Африке, Индии и в Пенсильвании были сделаны новые измерения градуса меридиана. Все эти измерения подтвердили увеличение градусов от экватора к полюсам.

Следующая таблица дает длину крайних измеренных градов и среднего града между полюсом и экватором. Первый был измерен в Перу Бугером и Лакондамином, второй — результат большой новой операции, недавно выполненной для определения длины дуги, пересекающей Францию от Дюнкерка до Перпиньяна, которую продолжили на юг до острова Форментера. На севере ее соединили с меридианом Гринвича, связав треугольниками берега Франции с Англией. Эта огромная дуга, охватывающая седьмую часть расстояния от полюса до экватора, была определена с исключительной точностью. Астрономические и геодезические измерения были сделаны с помощью повторительных кругов. Два базиса, каждый длиною более 12 000 м, были измерены один около Мелена, другой вблизи Перпиньяна — новым методом, не оставляющим никакой погрешности. Правильность всех операций подтверждается тем, что длина базиса в Перпиньяне, вычисленная от базиса в Мелене через цепь треугольников, которые их соединяют, отличается не больше, чем на треть метра от его непосредственно измеренной величины, хотя разделяющее их расстояние превышает 900 000 м.

Чтобы не оставалось желать ничего больше в этой важной операции, в разных точках этой дуги определялась высота полюса и число колебаний одного и того же маятника в течение одних суток, откуда вывели вариации длины градуса и силы тяжести. Таким образом, эта операция, наиболее точная и обширная из всех предприятий такого рода, послужит монументом, констатирующим состояние науки и искусства в этом просвещенном веке. Наконец, длина третьего града была определена Сванбергом в Лапландии.

| Высота полюса | Длина града |
|---|---|
| $0^{g}00$ [$0^{\circ}00$] | 99 523.9 м |
| $50^{g}08$ [$45^{\circ}07$] | 100 004.3 м |
| $73^{g}71$ [$66^{\circ}34$] | 100 323.6 м |

Возрастание длины градуса меридиана при увеличении высоты полюса заметно даже в различных частях большой дуги, о которой мы только что говорили. Действительно, рассмотрим ее крайние точки и Пантеон в Париже — один из промежуточных пунктов. Из наблюдений было найдено:

| | Высота полюса | Расстояние от Гринвича по меридиану |
|---|---|---|
| Гринвич | $57^{g}19753$ [$51^{\circ}477778$] | 0.0 м |
| Пантеон | $54^{g}27431$ [$48^{\circ}84688$] | 292719.3 |
| Форментера | $42^{g}96178$ [$38^{\circ}66560$] | 1423636.1 |

Расстояние от Гринвича до Пантеона дает 100 135.2 м для одного града, середина которого соответствует высоте полюса $55.^{g}73592$ [$50.^{\circ}16233$], а по расстоянию от Пантеона до острова Форментера получается только 99970.3 м для града, середина которого соответствует $48.^{g}61804$ [$43.^{\circ}75624$], что дает увеличение града между этими двумя пунктами на 23.167 м.

Так как после окружности эллипс является самой простой из замкнутых кривых, Землю стали рассматривать как тело, образованное вращением эллипса вокруг его малой оси. Его сжатие в направлении полюсов является необходимым следствием наблюдаемого возрастания градусов меридиана от экватора к полюсам. Поскольку сила тяжести направлена по радиусам дуг этих градусов, по закону равновесия жидкостей они перпендикулярны поверхности морей, которые покрывают большую часть Земли. Они не оканчиваются, как у шара, в центре эллипсоида; ни по направлению, ни по длине они не совпадают с радиусами, проведенными из этого центра к поверхности и пересекающими ее наклонно везде, кроме полюсов и экватора. Пересечение двух соседних отвесных линий, расположенных на одном меридиане, является центром малой земной дуги, которую они заключают. Если бы этот отрезок дуги был прямой, линии отвеса были бы параллельными и встречались бы только в бесконечности. Но по мере того, как он изгибается, они встречаются на тем меньшем расстоянии, чем кривизна делается больше; поскольку конец малой оси является точкой, где эллипс ближе всего уподобляется прямой линии, радиус градуса на полюсе, а следовательно, и сам градус будет наибольшим из всех. Напротив, на конце большой оси эллипса, на экваторе, где кривизна самая большая, длина градуса в направлении меридиана самая маленькая. Изменяясь от второго к первому из этих крайних значений, градусы возрастают и, если эллипс имеет небольшое сжатие, их увеличение очень близко пропорционально квадрату синуса высоты полюса над горизонтом.

*Сжатием*, или *эллиптичностью*, эллиптического сфероида называют избыток его экваториальной оси над полярной, принятой за единицу. Чтобы его определить, достаточно измерить два градуса в направлении меридиана. Если сравнить между собой дуги, измеренные во Франции, в Перу и в Индии, которые благодаря своей протяженности, отдаленности друг от друга, тщательности измерений и репутации наблюдателей заслуживают предпочтения, то находим, что сжатие земного эллипсоида равно 1/310, длина большой полуоси равна 6 376 606 м и длина малой полуоси равна 6 356 215 м.[11]

Если бы Земля была эллиптической, то сравнивая попарно разные измерения земных градусов, мы должны были бы получить приблизительно одинаковые величины сжатия. Но их сравнение между собой дает различия, которые трудно объяснить только ошибками наблюдений. Поэтому представляется, что Земля не имеет форму совершенно правильного эллипсоида. Посмотрим теперь, каковы свойства земных меридианов при любом предположении о фигуре Земли.

Плоскость небесного меридиана, определяемая астрономическими наблюдениями, проходит через ось мира и через зенит наблюдателя, поскольку эта плоскость делит на равные части параллельные экватору дуги, описываемые звездами над горизонтом. Все точки на Земле, имеющие зенит на окружности этого меридиана, образуют соответствующий земной меридиан. Имея в виду огромность расстояния до звезд, отвесные линии, восставленные из этих точек, можно считать параллельными плоскости небесного меридиана. В результате земной меридиан можно определить как кривую, образованную соединением оснований всех отвесных линий, параллельных плоскости небесного меридиана. Эта кривая лежит целиком в плоскости этого меридиана в случае, если Земля есть тело вращения. Во всех других случаях она от этой плоскости отклоняется. В общем случае она представляется линией, которую геометры называют *кривой двоякой кривизны.*

Земной меридиан не есть линия, в точности определяемая тригонометрическими измерениями в направлении небесного меридиана. Первый отрезок измеренной линии касателен к поверхности Земли и параллелен плоскости небесного меридиана. Если этот отрезок продолжить до встречи с бесконечно близкой отвесной линией и затем перегнуть это продолжение к основанию линии отвеса, получим второй отрезок кривой и таким же способом и другие. Линия, проведенная таким способом, — самая короткая из всех, которые можно провести на поверхности Земли между какими-нибудь двумя точками, взятыми на этой линии. Она не лежит в плоскости небесного меридиана и совпадает с земным меридианом только в том случае, если Земля есть тело вращения, но разница между длиной этой линии и длиной соответствующей дуги земного меридиана столь мала, что, не внося заметной ошибки, ею можно пренебречь.

Очень важно умножить измерения Земли во всех направлениях и в возможно большем числе мест. Можно в каждой точке земной поверхности представить оскулирующий эллипсоид, совпадающий с ней на небольшом участке вокруг точки касания. Земные дуги, измеренные в меридиональном направлении и перпендикулярно к нему, позволят узнать свойства и положение этого эллипсоида, который может и не быть фигурой вращения и заметно изменяться на больших расстояниях.

Каковы бы ни были свойства земных меридианов, уже только потому, что длина градуса уменьшается от полюса к экватору, Земля сжата у полюсов, т. е. полярная ось меньше экваториальной. Чтобы это показать, положим, что Земля есть тело вращения, и представим себе радиус одного градуса на Северном полюсе и ряд всех этих радиусов от полюса до экватора, радиусов, которые, по предположению, все время уменьшаются.

Очевидно, что эти радиусы образуют своими последовательными пересечениями кривую, которая сперва касательна к полярной оси за экватором относительно Северного полюса, затем обращается выпуклостью к этой оси и поднимается к плоскости экватора до тех пор, пока

радиус градуса меридиана не примет направление, перпендикулярное к исходному: тогда он оказывается в плоскости экватора. Если представить себе радиус полярного градуса гибким и охватывающим последовательно дуги кривой, которую мы только что рассматривали, его конец опишет земной меридиан, и его часть, заключенная между меридианом и кривой, будет радиусом соответствующего градуса меридиана. Эта кривая у геометров называется *разверткой* меридиана (эвольвентой). Примем теперь за центр Земли пересечение экваториального диаметра и полярной оси. Сумма двух касательных к развертке меридиана, проведенных из этого центра, первая — по полярной оси, а вторая — по диаметру экватора, будет больше, чем заключенная между ними дуга развертки. Радиус, проведенный из центра Земли к Северному полюсу, равен радиусу полярного градуса без первой касательной, а полудиаметр экватора равен сумме радиуса градуса меридиана на экваторе и второй касательной. Избыток полудиаметра над земным радиусом на полюсе равен сумме этих двух касательных без избытка радиуса полярного градуса над радиусом градуса меридиана на экваторе. Этот последний избыток и есть сама дуга развертки, дуга, которая меньше суммы экстремальных касательных. Следовательно, избыток полудиаметра экватора над радиусом, проведенным из центра Земли, положителен. Можно также доказать, что избыток этого полудиаметра над радиусом, проведенным из центра Земли к Южному полюсу, тоже положителен. Поэтому вся полярная ось меньше диаметра экватора, или, что сводится к тому же, Земля сжата с полюсов.

Рассматривая каждую часть меридиана как развертку очень малой дуги ее оскулирующей окружности, легко увидеть, что радиус, проведенный из центра Земли к концу дуги, более близкому к полюсу, меньше, чем радиус, проведенный из этого же центра к другому концу. Отсюда следует, что земные радиусы увеличиваются от полюса к экватору, если, как это указывают все наблюдения, градусы дуги меридиана увеличиваются от экватора к полюсам.

Разность радиусов градуса меридиана на полюсе и на экваторе равна разности соответствующих земных радиусов плюс избыток удвоенной развертки над суммой двух экстремальных касательных; избыток этот, очевидно, положителен. Следовательно, градусы меридиана возрастают от экватора к полюсу в большем отношении, чем уменьшаются земные радиусы. Ясно, что эти доказательства имеют место и в том случае, если северное и южное полушария Земли не одинаковы и не подобны; их легко распространить также на случай, если бы Земля не была телом вращения.

Из главных пунктов Франции, расположенных на меридиане Парижской обсерватории, были построены кривые, проведенные таким же образом, как и линия, описанная выше, но с той разницей, что их первый отрезок, всегда касательный к поверхности Земли, вместо того, чтобы быть параллельным плоскости небесного меридиана Парижской обсерватории, был ему перпендикулярен. По длине этих кривых и по рас-

стояниям от обсерватории до точек их пересечения с меридианом были определены положения этих точек. Эта работа, самая полезная из тех, что были сделаны в географии, является образцом, которому просвещенные нации спешат подражать и который вскоре будет распространен на всю Европу.

Геодезическими методами невозможно определить относительные положения мест, разделенных обширными морями, и в этих случаях следует прибегать к небесным наблюдениям. Одним из наибольших достоинств астрономии является то, что она обеспечивает нам возможность определения положений этих мест. Для этого используют метод, применяемый для составления каталога звезд, проводя на поверхности Земли круги, соответствующие тем, которые ранее воображались на небе. Так, ось небесного экватора пересекает поверхность Земли в двух диаметрально противоположных точках, каждая из которых имеет в своем зените один из полюсов мира, и которые можно рассматривать как полюса Земли. Пересечение плоскости небесного экватора с этой поверхностью образует окружность, рассматриваемую как земной экватор. Пересечения плоскостей всех небесных меридианов с тою же поверхностью образуют кривые, сходящиеся у полюсов; и если Землю считать телом вращения, что можно сделать в географии без ощутимой ошибки, это будут земные меридианы. Наконец, малые окружности, проведенные на Земле параллельно плоскости экватора, будут земными параллелями, и земная параллель любого места соответствует небесной параллели, проходящей через его зенит.

Положение какого-либо пункта на Земле определяется его расстоянием от экватора или дугой земного меридиана, заключенной между экватором и его параллелью, и углом, образованным его меридианом с первым меридианом, выбор которого произволен и к которому относят все другие меридианы. Расстояние пункта от экватора зависит от угла между зенитом этого пункта и небесным экватором, а этот угол, очевидно, равен высоте полюса над горизонтом. Эту высоту называют *географической широтой.* Угол, составленный меридианом места с первым меридианом, называют *долготой.* Этот угол измеряется дугой экватора, заключенной между этими меридианами. Долгота может быть восточной или западной в зависимости от того, находится ли пункт к востоку или к западу от первого меридиана.

Наблюдение высоты полюса дает широту. Долгота определяется путем одновременного наблюдения какого-нибудь небесного явления на меридианах, взаимное положение которых определяется. Если меридиан, от которого ведется счет долгот, находится на востоке от того, долготу которого ищут, то Солнце придет к его небесному меридиану раньше. Если, например, угол, образованный земными меридианами, равен четверти окружности, разность между моментами полудня на этих меридианах будет равна четверти суток. Предположим, что на каждом из них наблюдается явление, наступающее в один физический момент для всех точек Земли, такое, как начало или конец затмения Луны или

спутников Юпитера. Разница во времени, отмеченная наблюдателями этого явления, будет относиться к целым суткам как угол, образованный двумя меридианами, относится к целой окружности. Солнечные затмения и покрытия звезд Луной дают более точные методы определения долгот благодаря точности, с которой можно наблюдать начало или конец этих явлений. Правда, они не наступают в один и тот же физический момент для всех точек на Земле, но элементы лунного движения достаточно известны, чтобы точно учесть эту разность.

Для определения долготы места нет необходимости, чтобы небесное явление обязательно наблюдалось на первом меридиане. Достаточно, чтобы оно было наблюдено на меридиане, положение которого относительно первого известно. Именно таким способом, последовательно связывая меридианы один с другим, были определены относительные положения самых отдаленных точек на Земле. С помощью астрономических наблюдений уже было определено множество пунктов и исправлены большие ошибки в положениях и протяженности давно известных стран. Были зафиксированы положения новых стран, к открытию которых привели интересы коммерции и любовь к науке. Но несмотря на то что путешествия, предпринятые в последние времена, значительно увеличили наши географические познания, еще многое остается неоткрытым. Внутренняя Африка, Новая Голландия * заключают огромные страны, совершенно нам неизвестные. Мы имеем только недостоверные и часто противоречивые сведения о многих других странах, относительно которых география, до сих пор предоставленная случайностям догадок, ожидает от астрономии ясных указаний, чтобы бесповоротно зафиксировать их положение.

Долготы и широты недостаточно, чтобы определить положение точки на Земле. К этим двум горизонтальным координатам необходимо добавить третью, вертикальную координату, которая определяет ее высоту над уровнем моря. Здесь находит свое самое полезное применение барометр: многочисленные и точные наблюдения, выполненные с этим инструментом, прольют такой же свет на фигуру Земли по высоте, как астрономические наблюдения уже сделали это по двум другим ее измерениям.

Для мореплавателя, когда он, находясь в открытом море, имеет для ориентировки только звезды и компас, особенно важно знать свое положение и положения мест, куда он должен прийти, а также рифов, встречающихся ему на пути. Он легко может узнать свою широту по наблюдениям высоты звезд. Счастливое изобретение октанта и повторительного круга придали наблюдениям такого рода неожиданную точность. Но поскольку небо в силу своего суточного вращения представляется почти одинаковым в течение суток для всех точек на его параллели, мореплавателю трудно отметить точку, в которой он находится. Чтобы дополнить астрономические наблюдения, он измеряет скорость и

* Имеется в виду Индонезия (Прим. перев.).

направление своего движения, выводит свой ход в направлении параллели и, сравнивая его со своими наблюдениями широт, определяет свою долготу относительно исходного пункта. Неточность этого способа приводит к ошибкам, могущим быть для него гибельными, если он оказывается ночью покинутым на произвол ветра, вблизи берегов или мелей, от которых по своему расчету он считает себя достаточно удаленным. Как только прогресс техники и астрономии позволил надеяться на разработку методов определения долготы на море, торговые нации, чтобы избавиться от этих опасностей, путем щедрых поощрений поспешили направить усилия ученых и изобретателей по этому пути. Их стремление было удовлетворено изобретением морских часов и доведением лунных таблиц до исключительной точности. Эти два новшества, ценные сами по себе, дают еще лучшие результаты, когда они взаимно дополняют друг друга.

Часы, хорошо отрегулированные в порту, положение которого известно, и сохраняющие при перевозке на судне свой ход, в каждый момент показывают время, соответствующее этому порту. Как мы видели, разность этого времени и времени, определенного на море, так относится к суткам, как разность долгот к окружности. Но создание таких часов было делом очень трудным. Неравномерные движения судна, изменения температуры и неизбежное трение, очень ощутимое в таких чувствительных приборах, были препятствиями к достижению их точности. Эти препятствия удалось удачно преодолеть и построить часы, которые в течение многих месяцев сохраняют почти равномерный ход и, таким образом, дают самый простой способ определения долготы на море; поскольку этот способ тем точнее, чем короче время, в которое используют эти часы без поверки их хода, они очень полезны для определения взаимных положений двух близко расположенных мест. В этом отношении они имеют даже некоторое преимущество над астрономическими наблюдениями, точность которых не увеличивается при сближении пунктов наблюдения.[12]

Часто повторяющиеся затмения спутников Юпитера дали бы мореплавателям легкий способ определять долготу, если бы они наблюдали их в море. Но все попытки преодолеть трудности этих наблюдений, возникающие из-за качки корабля, до сих пор оказались бесплодными. Тем не менее, навигация и география извлекли из этих затмений, особенно из затмений первого спутника, у которого можно точно наблюдать начало или конец явления, большие выгоды. Мореплаватели с успехом используют их во время стоянок в порту. Правда, им необходимо знать время, когда то же затмение, которое они наблюдают, видно под известным меридианом, потому что разность времен, отсчитанных одновременно на разных меридианах, определяет разность их долгот. Но таблицы затмений первого спутника Юпитера, значительно улучшенные в наши дни, для парижского меридиана дают моменты этих затмений с точностью, почти равной точности самих наблюдений.

Крайняя трудность наблюдения этих затмений на море заставила прибегнуть к другим небесным явлениям, из которых только быстрое

движение Луны может служить для определения земных долгот. Положение Луны, видимое из центра Земли, может быть легко получено из измерения углового расстояния от Солнца и звезд. Таблицы ее движения дают затем время, соответствующее первому меридиану, когда Луна наблюдается на нем в таком же положении, и мореплаватель, сравнивая его с временем, отсчитанным им на своем корабле в момент наблюдения, определяет свою долготу по разности этих времен.

Чтобы оценить точность этого метода, надо учесть, что вследствие погрешностей наблюдения положение Луны, определенное наблюдателем, не соответствует в точности времени, отмеченному по его часам, и что из-за ошибок таблиц это положение не соответствует моменту прохождения первого меридиана, указанному в таблицах. Следовательно, разность этих времен не равна той, которая была бы при безошибочных наблюдениях и таблицах. Предположим, что ошибка, сделанная при определении этой разности, равна 1 мин [$1.^{m}44$]. За это время $40^{c}$ [$21.'6$] экватора пройдут под меридианом, и это соответствует ошибке в положении корабля, которая па экваторе близка к 40 000 м. Однако на параллелях она меньше. Кроме того, она может быть уменьшена увеличением числа наблюдений расстояний от Луны до Солнца или звезд и повторением их в течение нескольких дней, чтобы компенсировать и уничтожить одни из ошибок наблюдений и таблиц другими.

Ясно, что ошибки в долготе, обусловленные погрешностями наблюдений и таблиц, тем меньше, чем быстрее движется светило. Следовательно, с этой точки зрения наблюдения Луны в перигее выгоднее, чем в апогее. Если бы использовалось движение Солнца, приблизительно в тринадцать раз более медленное, чем движение Луны, то и ошибки в долготе были бы в тринадцать раз больше. Отсюда следует, что из всех светил только Луна, у которой движение достаточно быстрое, может служить для определения долгот на море. Из этого видно, как полезно было улучшить ее таблицы.

Желательно, чтобы все народы Европы, вместо того чтобы относить географические долготы к меридианам своих главных обсерваторий, условились бы отсчитывать их от одного и того же меридиана, задаваемого самой природой, чтобы во все времена его можно было легко находить. Это соглашение ввело бы в их географию то же единообразие, какое уже имеют их календари и их арифметика, единообразие, которое, распространившись па множество объектов их взаимоотношений, создало бы из этих разных народов одну огромную семью. Птолемей провел свой первый меридиан через Канарские острова, как лежащие на западном пределе известных тогда стран. После открытия Америки этот довод больше не существует, но один из этих островов предлагает нам одну из наиболее замечательных точек на Земле благодаря ее вышине и изолированности. Это — вершина пика Тенерифе. Вместе с голландцами можно было бы взять меридиан этого пика как начало земных долгот, определив путем очень большого числа астрономических определений его положение относительно главных обсерваторий. Но независимо от того, будет ли установлен или нет общий меридиан, для будущих веков

было бы полезно знать точное положение обсерваторий относительно вершин некоторых гор, всегда легко узнаваемых благодаря их высоте и неизменности, таких как Монблан, возвышающийся над массивом громадной и неизменной цепи Альп.

Очень примечательное явление, о котором мы узнали из астрономических экспедиций, это изменение силы тяжести на поверхности Земли. Эта своеобразная сила воздействует в данном месте на все тела пропорционально их массам и стремится сообщить им одинаковые скорости за одно и то же время. С помощью весов невозможно обнаружить ее изменения, так как она влияет одинаково как на тело, которое взвешивается, так и на гирю, с которой оно сравнивается. Но эти изменения можно измерить, сравнивая эту гирю с постоянной силой, такой как давление воздуха при неизменной температуре. Так, если перевозить в разные места манометр, заполненный некоторым объемом воздуха, давление которого поднимает столб ртути во внутренней трубке, то ясно, что поскольку вес столба ртути в трубке должен всегда уравновешивать давление этого воздуха при постоянной температуре, высота столба будет обратно пропорциональна силе тяжести, изменения которой она, следовательно, и укажет. Наблюдения качаний маятника также дают способ очень точного определения этих изменений, так как ясно, что его колебания должны быть медленнее в местах, где сила тяжести меньше. Этот инструмент, применение которого в часах было одной из главных причин успехов современной астрономии и географии, состоит из тела, подвешенного на конце нити или стержня, качающегося около неподвижной точки, расположенной на другом конце. Маятник немного отклоняют от вертикального положения, предоставив его затем действию силы тяжести. Он совершает небольшие колебания почти одинаковой продолжительности, несмотря на различия описываемых им дуг. Эта продолжительность зависит от величины и формы подвешенного тела, от массы и длины стержня. Однако геометры нашли общие правила, чтобы из наблюдений качаний сложного маятника любой формы определять длину маятника, колебания которого имели бы известную продолжительность и у которого масса стержня предполагалась бы равной нулю по отношению к массе тела, рассматриваемого как бесконечно плотная точка. К этому идеальному маятнику, названному простым маятником, отнесены все опыты с маятниками, выполненные в разных точках Земли.

Рише, посланный в 1672 г. Академией наук в Кайенну для выполнения астрономических наблюдений, нашел, что его часы, отрегулированные в Париже по среднему времени, в Кайенне отставали ежедневно на заметную величину. Это интересное наблюдение дало первое прямое указание на то, что сила тяжести на экваторе уменьшается. Оно было повторено с большой тщательностью и в большом числе точек, с учетом температуры и сопротивления воздуха. В результате всех измерений с секундным маятником было установлено, что его длина увеличивается от экватора к полюсу.

Взяв за единицу длину маятника, делающего в Парижской обсерватории 100 000 колебаний в сутки, нашли, что на уровне моря на эква-

торе его длина равна 0.99669, тогда как в Лапландии, в точке с высотой полюса 74.$^g$22 [66.°80], она оказалась 1.00137. Путем многочисленных и точных наблюдений Борда установил, что в обсерватории Парижа длина маятника, принятая за единицу и приведенная к пустоте, равна 0.741887 м.

Увеличение длины маятника при переходе от экватора к полюсам заметно даже на разных точках большой дуги меридиана, пересекающей Францию, как это видно из следующей таблицы результатов многочисленных и точных исследований, сделанных Био, Араго и Матьё.

| Место определения | Высота полюса | Высота над уровнем моря | Наблюденная длина секундного маятника * |
|---|---|---|---|
| Форментера | 42.$^g$96 [38°66] | 196 м | 0.$^м$7412061 |
| Бордо | 49.82 [44.84] | 0 | 0.7412615 |
| Париж | 54.26 [48.83] | 65 | 0.7419076 |
| Дюнкерк | 56.67 [51.00] | 0 | 0.7420865 |

Длины, определенные в Дюнкерке и в Бордо, путем интерполяции для длины секундного маятника на берегах Франции, на уровне моря, при высоте полюса 50$^g$ [45°] дают величину 0.7416274 м. Эта длина и длина градуса меридиана, середина которого соответствует той же точке, послужит, чтобы снова найти наши меры, если с течением времени они изменятся.

Увеличение длины маятника происходит более равномерно, чем увеличение градуса меридиана. Оно меньше отклоняется от отношения квадратов синусов высоты полюса, потому что его измерение, более легкое, чем градусные измерения, вносит меньше ошибок или из-за того, что причины, возмущающие правильность фигуры Земли, оказывают меньшее влияние на силу тяжести. Сравнивая между собой все наблюдения, сделанные до сих пор в разных местах Земли, находим, что если за единицу взять длину маятника на экваторе, ее увеличение от экватора к полюсу равно произведению 0.0054 на квадрат синуса широты.[13]

Кроме того, с помощью маятников было замечено небольшое уменьшение силы тяжести на вершинах высоких гор. Бугер сделал в Перу много таких опытов. Он нашел, что если принять за единицу силу тяжести на экваторе на уровне моря, то в Кито на высоте 2857 м над этим уровнем она будет 0.999249 и на Пичинче на высоте 4744 м — 0.998816. Это уменьшение силы тяжести на высотах, которые очень малы по сравнению с радиусом Земли, дает основание думать, что изменения силы тяжести на больших расстояниях от центра Земли очень значительны.

---

* Лаплас относит длину маятника к метрической секунде. См. с. 19 (Прим. перев.).

Наблюдения маятников, доставляющие неизменную и легко воспроизводимую во все времена длину, породили идею использовать ее как универсальную меру. Нельзя видеть чрезмерное число применяемых мер не только у разных народов, но даже у одной нации, их странные и неудобные для расчетов деления, трудность их определения и сравнения и, наконец, затруднения и обманы, которые из-за этого возникают в торговле, без того, чтобы не оценить как одну из самых больших услуг, какую правительства могут оказать обществу, — принятие системы мер, единообразные деления которой легче всего поддаются подсчетам и которая вытекает наименее сложным образом из фундаментальной меры, указанной самой природой. Народ, который ввел бы подобную систему, получил бы не только преимущество пожать ее первые плоды, но и увидел бы, как другие народы последуют его примеру, и заслужил бы их благодарность, так как власть разума медленно, но неизбежно вознесет его над национальными самолюбиями и преодолеет другие препятствия, противостоящие всеобщему благу.

Таковы были мотивы, побудившие Учредительное собрание поручить это важное дело Академии наук. Новая система мер и весов явилась результатом работы уполномоченных Академии наук, при ревностном и просвещенном участии нескольких народных представителей.

Тождественность десятичного исчисления и исчисления целых чисел не оставляет никаких сомнений в преимуществах деления всех мер на десятичные доли. Чтобы в этом убедиться, достаточно сравнить трудности умножения и деления смешанных чисел с простотой тех же операций над целыми числами; эта простота делается еще большей при применении логарифмов, которые можно с помощью простых и дешевых приборов ввести во всеобщее употребление. В самом деле, наша арифметическая шкала не делится на три и на четыре, на эти два по своей простоте очень часто употребляемые делителя. Прибавления еще двух единиц было бы достаточно, чтобы обеспечить ей это преимущество. Но такое значительное изменение было бы неминуемо отвергнуто вместе с подчиненной этому изменению системой мер. Двенадцатеричная система имеет то неудобство, что требует запоминания попарных произведений первых одиннадцати чисел, что превышает обычную емкость памяти, к которой десятичная система хорошо приспособлена. Наконец, потерялось бы преимущество, по-видимому, породившее нашу арифметику, — употреблять для счета пальцы рук. Поэтому без колебаний была принята десятичная система и, чтобы внести единообразие во всю систему мер, было решено образовать эти меры из одной линейной меры и ее десятичных подразделений. Таким образом, вопрос свелся к выбору этой универсальной единицы, получившей название *метра*.

Длина маятника и меридиана — вот два главных способа, которые природа дает нам для установления единицы линейных измерений. Оба они не зависят от моральных потрясений и могут испытывать заметные перемены лишь при очень больших изменениях в физическом состоянии Земли. Первый, легко применимый способ имеет то неудобство, что в нем изменение расстояний зависит от двух элементов, неоднородных измеряе-

мой длине, — от силы тяжести и времени, деление которого к тому же произвольно; и шестидесятеричное деление нельзя было допустить при создании десятичной системы измерения. Поэтому остановились на втором способе, применявшемся, по-видимому, в глубокой древности, поскольку для человека естественно соотносить меру пути с размерами Земли, на которой он живет.

Перемещаясь по земному шару, он только по именованию пройденного пространства знает отношение этого пути к окружности всей Земли. В этом есть еще то преимущество, что навигационные измерения приходят в соответствие с небесными. Часто мореплавателю приходится измерять пройденный им путь небесной дугой, заключенной между зенитами точек его выхода и прихода или, наоборот, измерять небесную дугу пройденным путем. Поэтому удобно, чтобы одно из этих измерений было выражением другого, различаясь лишь в единицах измерения. Но для этого необходимо, чтобы фундаментальная единица длины была соизмерима части земного меридиана, соответствующей одному из делений окружности. Так, выбор метра свелся к выбору единицы углов.

Прямой угол является пределом наклонов линии к плоскости и высот предметов над горизонтом. Кроме того, в первой четверти окружности формируются синусы и вообще все функции, которые использует тригонометрия и отношения которых к радиусу сведены в таблицы. Поэтому было естественно взять прямой угол за единицу углов и четверть окружности — за единицу их измерения. Ее разделили на десятичные части и чтобы иметь на Земле соответствующие меры, на такие же части разделили четверть земного меридиана, что было сделано еще в древности, так как упоминаемое Аристотелем измерение Земли, история которого неизвестна, дает для длины четверти меридиана 100 000 стадиев. Оставалось лишь точно определить ее длину. Здесь надо выяснить два вопроса: каково отношение дуги меридиана, измеренной под некоторой заданной широтой, ко всему меридиану? Все ли меридианы равны между собой? При самых естественных гипотезах о строении земного сфероида разность меридианов несущественна, и *десятичный градус*,* середина которого соответствует широте $50^{g}$ [45°], равен сотой доле четверти меридиана. Ошибка, возможная при этих гипотезах, могла бы выявиться лишь при определении географических расстояний, где это не имеет никакого значения. Следовательно, можно было вывести длину четверти меридиана из той дуги, которая пересекает Францию от Дюнкерка до Пиренеев и которая была измерена в 1740 г. французскими академиками. Но поскольку новое измерение еще большей дуги, сделанное более точными способами, могло вызвать к новой системе мер и весов большой интерес, способствующий ее распространению, было решено измерить дугу земного меридиана, заключенную между Дюнкерком и Барселоной. Это большая дуга, продолженная на юг до Форментеры и на север до параллели Гринвича и имевшая середину, очень близко соответствующую средней параллели между полюсом и эквато-

---

* Десятичный градус, или град (Прим. перев.).

ром, дала длину четверти меридиана, равную 5 130 740 туазов. За метр, или единицу для линейных измерений, была взята одна десятимиллионная часть этой величины. Величина, в десять раз бо́льшая, была бы слишком велика, а в десять раз меньшая — слишком мала, и метр, длина которого равна 0.513074 туаза, с успехом заменил туаз и локоть — две наши наиболее употребительные меры.

Все меры получаются из метра самым простым способом: линейные меры представляют его десятичные кратные.

Единица для измерения емкости представляет собою куб десятой доли метра. Ее назвали *литром*.

Единица для измерения поверхности Земли представляет собою квадрат со стороной в десять метров, ее называют *аром*.

*Стером* называют единицу для измерения объема дров, равную одному кубическому метру.

Единица веса, которую назвали *граммом*, равна весу одной миллионной кубического метра дистиллированной воды в пустоте, при максимальной плотности воды. По замечательной особенности воды, этот максимум не соответствует температуре замерзания, и оказывается выше ее, около 4° по термометру. Охлаждаясь ниже этой температуры, вода снова начинает расширяться и приготовляться к увеличению объема, которое происходит при ее переходе из жидкого состояния в твердое. Вода была выбрана как наиболее однородная субстанция, которую легче всего можно привести в состояние чистоты. Лефевр-Жино определил грамм путем длинной серии тонких опытов над удельным весом полого цилиндра из меди, объем которого он измерял с величайшей тщательностью. В результате он получил, что фунт (ливр), являющийся одной двадцать пятой частью столбика из пятидесяти марок и хранящийся в Парижском монетном дворе, относится к грамму как 489.5058 к единице. Вес в 1000 г, названный *килограммом*, или *десятичным фунтом*, таким образом, равен марковому фунту, умноженному на 2.04288.

Чтобы сохранить меры длины и веса, под наблюдением комиссаров, уполномоченных определить эти меры, были изготовлены эталоны килограмма и метра и после их проверки помещены в национальных архивах и в Парижской обсерватории. Эталоны метра являются эталонными только при определенной температуре, за которую принята температура тающего льда, как наиболее постоянная и не зависящая от изменений атмосферы. Эталоны килограмма представляют свой эталонный вес только в пустоте или при ничтожном давлении атмосферы. Чтобы воспроизводить метр в любое время, не прибегая каждый раз к измерению большой дуги меридиана, которая его дала, было необходимо установить его отношение к длине секундного маятника. Это и было выполнено Борда самым точным образом.

Поскольку все меры постоянно сопоставляют с деньгами, было особенно важно подразделить деньги на десятичные части. Единице было дано название *серебряного франка*, его десятая часть называется *десимом*, а сотая — *сантимом*. К франку была отнесена и ценность медных и золотых монет.

Чтобы облегчить подсчет количества чистого золота и серебра, содержащегося в монетах, примесь была установлена в одну десятую от их веса, а вес франка приравняли 5 г. Таким образом, франк, как точное кратное единицы веса, может служить для взвешивания тел, что полезно для торговли.

Наконец, единообразие системы мер и весов в целом требовало, чтобы и сутки были подразделены на десять часов, час — на сто минут, минута — на сто секунд. Это деление, столь необходимое астрономам, не так важно для гражданской жизни, где редко приходится использовать время как множитель или делитель. Трудности, связанные с переводом маятниковых и карманных часов на такое деление, и наши торговые связи в часовом деле с другими странами заставили отложить на неопределенное время его введение. Однако можно думать, что в будущем десятичное деление суток заменит теперешнее, которое слишком отличается от деления других мер, и поэтому будет отменено.

Такова новая система мер и весов, предложенная учеными Национальному конвенту, поспешившему ее утвердить. Эта система основана на измерении земных меридианов и одинаково пригодна для всех народов. Она связана с Францией только через дугу меридиана, пересекающую нашу страну. Но положение этой дуги так выгодно, что ученые всех национальностей, собравшиеся для установления универсальных мер, не могли бы сделать лучшего выбора. Чтобы умножить преимущества этой системы и сделать ее полезной всему миру, французское правительство пригласило иностранные правительства принять участие в этом деле, имеющем столь общий интерес. Многие направили в Париж выдающихся ученых, которые, встретившись с комиссарами Национального института, путем обсуждения наблюдений и опытов определили фундаментальные единицы веса и длины, так что установление этих единиц следует рассматривать как совместную работу ученых, участвовавших в ней, и народов, которых они представляли. Поэтому можно надеяться, что наступит день, когда эта система, сводящая все измерения и их вычислительную обработку к самым простым операциям десятичной арифметики, будет принята всеми, как некогда всеми была принята система счисления, дополнением к которой является новая система мер. Несомненно, что система счисления тоже преодолела предубеждения и привычки, всегда препятствующие введению новых мер. Но однажды введенные, эти меры будут поддержаны той самой силой, которая вместе с силой разума обеспечивает вечное существование человеческих учреждений.

## Глава XV

## О МОРСКИХ ПРИЛИВАХ И ОТЛИВАХ, ИЛИ О СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЯХ ФИГУРЫ МОРЯ

Хотя Земля и воды, которые ее покрывают, давно должны были бы прийти в состояние, соответствующее равновесию действующих на них сил, все же фигура морей непрерывно меняется в течение суток под действием регулярных периодических колебаний, известных под названием *морских приливов и отливов*. В самом деле, очень удивительно наблюдать при тихой погоде и ясном небе сильное движение огромной массы воды, которая стремительно разбивается о берега. Это зрелище наводит на размышление и порождает желание понять его причину. Но чтобы не заблудиться в бесполезных гипотезах, надо прежде всего знать законы этого явления и проследить его во всех деталях. Тысячи случайных причин могут изменить его, и поэтому надо одновременно рассматривать большое число наблюдений, чтобы влияния случайных причин взаимно уничтожились и в среднем остались бы только регулярные влияния. Кроме того, путем специального комбинирования наблюдений необходимо выявить каждое из этих влияний в отдельности. Но и этого еще недостаточно. Поскольку результаты наблюдений всегда подвержены ошибкам, необходимо знать вероятность того, что эти ошибки не превышают определенных заданных пределов. Известно, что при одинаковой вероятности эти пределы тем теснее, чем более многочисленны наблюдения. Во все времена это заставляло наблюдателей увеличивать число наблюдаемых фактов и опытов. Однако общее рассуждение не определяет степени точности результатов. Оно не позволяет узнать, какое число наблюдений надо сделать, чтобы получить определенную вероятность. Иногда оно заставляло исследовать причины явлений, имеющих чисто случайный характер. Одно только исчисление вероятности может оценить эти обстоятельства, что делает его употребление в высшей степени важным в физических и нравственных науках.

В начале прошлого века по просьбе Академии наук в наших портах было сделано большое число наблюдений приливов. В Бресте они ежедневно наблюдались в течение шести лет. Расположение этого порта очень выгодно для наблюдений такого рода. Он соединен с морем широким и длинным каналом, в глубине которого и построен порт. Вследствие этого нерегулярные движения моря доходят до порта весьма ослабленными подобно тому, как влияние качки корабля передается на столбик ртути в барометре ослабленным вследствие его затухания в трубке этого прибора. Кроме того, поскольку в Бресте приливы очень велики, их случайные вариации составляют лишь малую часть. Если, как я это сделал, рассмотреть отдельно превышения приливов над соседними отливами, то выясняется, что ветры, являющиеся главной причиной случайных движений моря, мало влияют на результаты, так как если они поднимают воду во время прилива, то приблизительно на столько же поднимают ее при отливе, который следует за приливом или

ему предшествует. Было также замечено, что результаты становятся правильными, если хоть немного увеличить число наблюдений. Пораженный этим, я попросил правительство распорядиться, чтобы в Брестском порту была проведена новая серия наблюдений морских приливов в течение полного периода движения узлов лунной орбиты, что и было выполнено. Эти наблюдения были начаты в 1806 г. и продолжаются ежедневно без перерыва. Проведя анализ всех этих наблюдений по способу, о котором уже упоминалось, я пришел к следующим результатам, не вызывающим никаких сомнений.

Уровень моря поднимается и опускается два раза в каждом интервале времени между двумя последовательными возвращениями Луны к верхнему меридиану. Средний промежуток времени между этими возвращениями равен 1.035050 суткам, так что интервал между двумя последовательными приливами равен 0.517525 суток.

Таким образом, иногда бывают солнечные сутки, в которых наблюдается только один прилив. Отливы делят этот интервал подобным же образом. Как и у всех величин, имеющих максимум и минимум, увеличение или уменьшение приливов около этих предельных значений пропорциональны квадратам промежутков времени, протекшего от полной или малой воды.

Высота прилива не всегда бывает одинакова. Она изменяется с каждым днем, и эти изменения имеют явное отношение к фазам Луны. Наибольшая высота бывает во время полнолуния и новолуния. Затем она уменьшается и становится наименьшей вблизи квадратур. В Бресте самый высокий прилив наступает не в самый день сизигии, но по истечении полутора суток. Таким образом, если сизигия наступает в момент прилива, третий после этого прилив будет самым высоким. Точно так же, если квадратура наступает во время прилива, то третий после него прилив будет самым низким. Это явление наблюдается почти одинаково во всех портах Франции, хотя время приливов в них очень сильно различается.

Чем больше море поднимается во время прилива, тем ниже опускается при следующем отливе. Мы назовем *полным приливом* превышение полусуммы высот двух последовательных приливов над высотой воды во время промежуточного отлива. Средняя величина этого полного прилива в Бресте во время равноденственных сизигий около 5.5 м. Во время квадратур она вдвое меньше.

Внимательно рассматривая эти результаты, мы видим, что поскольку число полных вод равно числу как верхних, так и нижних лунных прохождений через меридиан, луна оказывает на явление приливов главное влияние. Но из того, что квадратурные приливы меньше сизигийных, следует, что Солнце также участвует в этом явлении и даже видоизменяет лунные влияния. Естественно думать, что каждое из этих влияний, если бы оно существовало в отдельности, создавало бы систему приливов, период которой соответствовал бы прохождению светила через меридиан, и что смешение их периодов приводит к сложному приливу,

в котором лунный прилив совпадает в сизигиях с солнечным приливом, а в квадратурах — с солнечным отливом.

Склонения Солнца и Луны также оказывают заметное влияние на приливы. Они увеличивают полные сизигийные приливы во время равноденствий и на столько же увеличивают полные квадратурные приливы во время солнцестояний. Таким образом, широко распространенное мнение, что самые большие приливы происходят во время равноденственных сизигий, подтверждается большим числом точно обработанных наблюдений. Тем не менее некоторые ученые, и в особенности Лаланд, подвергают это суждение сомнению, поскольку вблизи некоторых солнцестояний вода в море поднималась на значительную высоту. Именно здесь исчисление вероятностей становится совершенно необходимым для решения важного вопроса теории приливов. Применяя этот метод исчисления к наблюдениям приливов, находим, что превосходство приливов в равноденственные сизигии и квадратурных приливов вблизи солнцестояний указывается с намного большей вероятностью, чем вероятность большинства фактов, относительно которых нельзя себе позволить никаких сомнений.

Расстояние Луны от Земли имеет большое влияние на величину полных приливов. При всех прочих равных условиях они увеличиваются и уменьшаются вместе с лунным диаметром и параллаксом, но в большем отношении. Изменения расстояния Солнца от Земли влияют подобным же образом, но в значительно меньшей степени.

Интересно знать закон изменения полных приливов главным образом вблизи их максимума и минимума. Мы уже видели, что момент максимально полного прилива в Бресте наступает через сутки с половиной после сизигии. Уменьшение соседних с ним полных приливов пропорционально квадрату времени, протекшего от него до момента промежуточной малой воды, к которой относится полный прилив.

Около момента минимума, следующего по истечении полутора суток после квадратуры, увеличение полных приливов пропорционально квадрату времени, протекшего с этого момента. Оно очень близко к удвоенному уменьшению полных приливов в их максимуме.

Склонения Солнца и Луны очень заметно влияют на эти изменения: уменьшение приливов вблизи сизигии солнцестояний составляет около трех пятых соответствующего уменьшения вблизи равноденственных сизигий. Увеличение приливов возле квадратур в два раза больше в равноденствиях, чем в солнцестояниях. Но влияние расстояния Луны от Земли еще значительнее, чем влияние склонения. Уменьшение сизигийных приливов почти в три раза больше около перигея Луны, чем возле ее апогея.

Наблюдаются еще небольшие различия между утренними и вечерними приливами, которые зависят от склонений Солнца и Луны и исчезают, когда оба эти светила находятся на экваторе. Чтобы их обнаружить, надо сравнить приливы первых и вторых суток после сизигии или квадратуры. В это время приливы очень близки к максимуму или минимуму и очень мало меняются от одних суток к другим, что позволяет

легко увидеть разницу между двумя приливами одних суток. В Бресте таким путем находим в сизигиях летнего солнцестояния, что утренние приливы первых и вторых суток после сизигий меньше вечерних приливов приблизительно на $^1/_6$ м. В сизигиях зимних солнцестояний они на столько же больше. Подобно этому в квадратурах осеннего равноденствия утренние приливы первых и вторых суток после квадратуры превосходят вечерние приливы приблизительно на $^1/_8$ м, а вблизи квадратур весеннего равноденствия они на такую же величину меньше.

Таковы в общих чертах явления, характеризующие высоту приливов в наших портах. В промежутках между ними обнаруживаются еще другие явления, которые мы сейчас изложим.

Полный прилив, наблюдаемый в Бресте в момент сизигии, наступает через 0.1780 суток после истинных полуночи и полудня в зависимости от того, происходит это утром или вечером. Этот промежуток времени, очень разный даже в близлежащих портах, называется *прикладным часом*, потому, что он определяет время приливов относительно лунных фаз. В момент квадратуры полная вода в Бресте наступает через 0.358 суток после истинных полуночи или полудня.

За каждый час, отделяющий прилив от момента сизигии, он опережает этот момент или отстает от него на 270 с [$234^s$]. Во время квадратур это часовое отклонение равно 502 с [$434^s$].

Время квадратурных или сизигийных приливов изменяется в зависимости от расстояния Солнца и главным образом Луны до Земли. Во время сизигий каждой минуте [$0.'54$] увеличения или уменьшения видимого полудиаметра Луны соответствует опережение или запаздывание момента наступления полной воды на 354 с [$306^s$]. Это же явление имеет место в квадратурах, но тогда оно в три раза меньше.

Склонения Солнца и Луны подобным же образом влияют на время наступления сизигийных и квадратурных приливов. В сизигиях солнцестояний время полной воды уходит вперед приблизительно на полторы минуты [$2.^m16$]. При равноденственных сизигиях оно на столько же запаздывает. Наоборот, в равноденственных квадратурах время полной воды уходит вперед приблизительно на восемь минут [$11.^m5$] и на столько же отстает при квадратурах солнцестояния.

Мы видим, что в среднем запаздывание приливов от одного дня до следующего равно 0.03505 суток, так что если прилив наступил через 0.1 суток после истинной полуночи, на следующий день он наступит через 0.13505 суток. Но это запаздывание меняется с фазами Луны. Оно самое малое вблизи сизигий, когда полный прилив максимален, и тогда оно равно 0.02723 суток. Когда приливы минимальны, т. е. вблизи квадратур, оно самое большое и достигает 0.05207 суток. Таким образом, разность моментов наступления приливов, соответствующих сизигиям и квадратурам, которая, как было указано, равна 0.20642 суток, возрастает для приливов, одинаково проходящих эти две фазы, и становится почти равной четверти суток во время максимальных и минимальных приливов.

Изменения расстояний от Солнца и в особенности от Луны до Земли влияют на запаздывание приливов от одного дня к другому. Каждая минута [0.′54] увеличения или уменьшения видимого полудиаметра Луны вблизи сизигии увеличивает или уменьшает это запаздывание на 258 с [$222^s$]. Это же происходит и во время квадратур, но в этом случае запаздывание в три раза меньше.

Ежесуточное запаздывание приливов изменяется еще из-за склонения двух этих светил. Во время сизигий при солнцестояниях оно приблизительно на 1 мин. [$1.^m44$] больше своего среднего значения. При равноденствиях оно на столько же меньше. При равноденственных квадратурах, наоборот, запаздывание превышает свою среднюю величину почти на 4 мин [$5.^m76$], а при квадратурах солнцестояний — на столько же меньше ее.

Результаты, которые я здесь изложил, были выведены из наблюдений, ежедневно производившихся в Бресте с 1807 г. до настоящего времени. Было интересно сравнить их с подобными же результатами, которые я извлек из наблюдений, сделанных в том же порту в начале прошлого века. Все эти результаты оказались в хорошем согласии между собой, и их небольшие расхождения укладываются в пределы ошибок, которым подвержены наблюдения. Итак, по прошествии целого века природа в этом отношении оказалась неизменной.

Из изложенного следует, что неравенства высот приливов и интервалов между ними имеют очень различные периоды. Одни из них суточные и полусуточные, другие — полумесячные и месячные, полугодовые и годовые. Наконец, есть периоды, совпадающие с периодами обращения узлов и перигея лунной орбиты, положение которых через склонение Луны и ее расстояние до Земли влияет на приливы.

Эти явления имеют место во всех портах и на всех берегах морей. Но местные условия, ничего не меняя в законах приливов, имеют большое влияние на их величину и на прикладной час.[14]

## Глава XVI

## О ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ И АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ

Земля окружена упругой разреженной и прозрачной средой, простирающейся на большую высоту. Как и все другие тела, она имеет вес, который уравновешивает вес ртутного столба в барометре. На параллели $50^g$ [45°] при температуре тающего льда и при средней высоте ртутного столба в барометре на уровне моря, высоте, которая может быть принята равной 0.76 м, вес воздуха относится к весу такого же объема ртути как единица относится к 10477.9. Отсюда следует, что, если подняться на 10.4779 м, высота столба ртути в барометре уменьшится почти точно на 1 мм и что, если бы плотность атмосферы везде была бы одинакова, ее высота была бы 7963 м. Но воздух сжимаем, и если считать его температуру постоянной, то в соответствии с общим законом,

которому подчиняются газы и пары жидкостей, плотность его пропорциональна весу, сжимающему этот воздух, и, следовательно, высоте барометра. Поэтому нижние слои воздуха, сжатые верхними, оказываются плотнее последних, которые делаются все более разреженными по мере увеличения высоты над Землей. Если бы у всех слоев воздуха была одинаковая температура, то при возрастании высоты в арифметической прогрессии плотность верхних слоев уменьшалась бы в геометрической. Чтобы это показать, рассмотрим вертикальный столб воздуха, пересекающий два бесконечно близких слоя атмосферы. Верхняя часть этого столба будет сжата меньше, чем соответствующая нижняя часть, на величину веса маленького столбика воздуха, заключенного между этими двумя частями. Так как температура предполагается одинаковой, разность сжатий двух рассматриваемых слоев будет пропорциональна разности их плотностей. Если отвлечься от изменения силы тяжести с высотой, эта разность пропорциональна весу маленького столбика и, следовательно, произведению его плотности на длину. Так как оба слоя предполагались бесконечно близкими, плотность столбика можно считать равной плотности нижнего слоя. Таким образом, дифференциальное изменение этой плотности пропорционально ее произведению на изменение высоты. Следовательно, если изменить эту высоту на равные величины, отношение дифференциала плотности к самой плотности будет постоянным, что характерно для геометрической убывающей прогрессии, у которой все члены между собой бесконечно близки. Отсюда следует, что при возрастании высоты слоев в арифметической прогрессии их плотность уменьшается в геометрической прогрессии и их логарифмы, как гиперболические, так и табличные, убывают в арифметической прогрессии.

Эти данные были использованы для измерения высот с помощью барометра. Предполагая, что температура воздуха везде одинакова, исходя из предыдущей теоремы, можно получить разность высот двух станций, умножая на постоянный коэффициент разность логарифмов высоты ртути в барометрах этих станций. Чтобы определить этот коэффициент, достаточно одного наблюдения. Так, мы уже видели, что если при температуре ноль градусов на нижней станции высота столба ртути в барометре была равна 0.76000 м, а на верхней — 0.75999 м, то эта станция находится выше нижней на 0.104779 м. Следовательно, постоянный коэффициент равен этой величине, разделенной на разность табличных логарифмов чисел 0.76000 и 0.75999, что дает для него 18 336 м. Но это правило для измерения высоты с помощью барометра нуждается в некоторых видоизменениях, которые мы сейчас изложим.

Температура атмосферы не одинакова: она уменьшается с высотой. Характер этого уменьшения непрерывно изменяется. Но по среднему результату из многих наблюдений можно оценить это уменьшение в 16 или 17 градусов на 3000 м высоты. Кроме того, воздух, как и все тела, расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении, а путем очень точных опытов было установлено, что его объем, взятый за единицу при температуре 0°, изменяется, как и у всех газов и паров, на 0.00375 на

каждый градус температуры; необходимо принять это во внимание при вычислении высот, так как ясно, что для получения такого же понижения высоты барометра надо подняться тем выше, чем пересекаемый слой воздуха более разрежен. Однако из-за невозможности точно знать изменение температуры самое простое, что можно сделать, это предположить эту температуру одинаковой и равной среднему из температур на двух рассматриваемых станциях. Так как объем столба воздуха увеличивается соответственно этой средней температуре, определяемая высота, отвечающая наблюденному понижению барометра, должна быть увеличена в том же отношении. Это равносильно умножению коэффициента 18 336 на единицу плюс число 0.00375, взятое столько раз, сколько градусов в средней температуре.

Водяные пары, находящиеся в атмосфере, при том же давлении и температуре имеют меньшую плотность, чем воздух, и, следовательно, уменьшают общую плотность атмосферы. А так как их количество, при прочих равных условиях, больше при сильной жаре, это частично можно учесть, несколько увеличив число 0.00375, выражающее расширение воздуха на каждый градус повышения температуры. Я нахожу, что, увеличив его до 0.004, можно достаточно хорошо удовлетворить совокупности наблюдений и употреблять его, по крайней мере, до тех пор, пока после длинного ряда наблюдений с гигрометром этот прибор не будет привлечен для барометрического определения высот.[15]

До сих пор мы предполагали силу тяжести постоянной. Но мы уже видели, что с увеличением высоты она немного уменьшается. Это требует от нас нового увеличения высоты, полученной по понижению барометра. Мы учтем это уменьшение силы тяжести, немного увеличив постоянный коэффициент. Сравнивая большое число барометрических наблюдений, сделанных у подножия и на вершине многих гор, высота которых была точно измерена тригонометрическим путем, г-н Рамоп получил для этого коэффициента значение 18 393 м, но с учетом изменения силы тяжести оно уменьшается до 18 336 м. Последнее значение коэффициента для отношения веса ртути к весу такого же объема воздуха дает величину 10477.9 на параллели $50^{g}$ [45°] при температуре 0° и высоте столба ртути барометра, равной 0.76 м. Г-да Био и Араго, взвешивая с большой тщательностью известные объемы ртути и воздуха, нашли для этого отношения, приведенного к той же параллели, величину 10 466.6, но они употребляли очень сухой воздух вместо того, чтобы брать его из окружающей атмосферы, в которой он всегда смешан с бо́льшим или меньшим количеством водяных паров, определяемым с помощью гигрометра. Эти пары легче воздуха в отношении почти 10 к 17. Поэтому непосредственные измерения должны давать немного меньшее отношение веса ртути к воздуху, чем барометрические наблюдения. Эти опыты уменьшают коэффициент 18 336 м до величины 18 316.6 м. Чтобы его поднять до величины 18 393 м, даваемой наблюдениями барометра, пришлось бы, если не учитывать изменения силы тяжести, предположить слишком большую среднюю влажность атмосферы. Таким образом, уменьшение силы тяжести с высотой заметно даже

при барометрических наблюдениях. Коэффициент 18 393 м почти точно исправляет влияние этого уменьшения. Но другое изменение силы тяжести, зависящее от широты места наблюдения, также должно влиять на этот коэффициент. Он был определен для широты, которую без ощутимой ошибки можно считать $50^g$ [45°], и должен быть увеличен на экваторе, где сила тяжести меньше, чем на этой широте. В самом деле, ясно, что на экваторе надо подняться выше, чтобы перейти от данного давления атмосферы к давлению, меньшему на определенную величину, так как в интервале вес воздуха меньше. Следовательно, коэффициент 18 393 м должен изменяться так же, как длина секундного маятника, укорачивающегося или удлиняющегося в зависимости от увеличения или уменьшения силы тяжести. На основании сказанного ранее об изменении этой длины легко заключить, что к этому коэффциенту надо прибавить произведение 26.164 м на косинус удвоенной широты места наблюдения.

Наконец, к высотам барометра надо придать еще небольшую поправку, зависящую от разности температур ртути в барометре на обеих станциях. Чтобы хорошо знать эту разность, в оправу барометра вставляют небольшой ртутный термометр таким образом, чтобы ртуть в этих двух приборах была всегда почти одинаковой температуры. На более холодной станции ртуть плотнее, и поэтому в барометре столбик ртути уменьшен. Чтобы его привести к длине, которую он имел бы, если бы его температура равнялась температуре на более теплой станции, его надо увеличить на его 5550-ю часть, умноженную на число градусов в разности температур ртути на обеих станциях.

Итак, вот правило для барометрического определения высот, которое мне кажется одновременно и наиболее точным, и самым простым. Прежде всего исправляется, как было указано, отсчет высоты ртути в барометре более холодной станции. Затем к коэффициенту 18 393 м прибавляется произведение 26.164 м на косинус удвоенной широты. Исправленный таким образом коэффициент умножается на табличный логарифм отношения наибольшей исправленной высоты барометра к наименьшей. Наконец, это произведение умножается на удвоенную сумму градусов термометров, указывающих температуру воздуха на каждой станции, и полученное произведение, разделенное на тысячу, прибавляется к предыдущему. Полученная сумма с большим приближением дает превышение верхней станции над нижней, особенно если отсчеты барометров сделаны в наиболее благоприятное время суток, которым представляется полдень.[16]

В небольших объемах воздух невидим. Но лучи света, отраженные всеми слоями атмосферы, вызывают ощутимый эффект видимости воздуха, окрашивая его в голубой цвет, который придает голубоватый оттенок отдаленным предметам и образует небесную лазурь. Вот почему мы видим туман, в который мы погружены, только на более или менее значительном расстоянии. Этот голубой свод, к которому небесные светила нам кажутся прикрепленными, стало быть, очень близок к нам. Это не что иное как земная атмосфера, и небесные тела расположены за ее

пределами на огромных расстояниях. Солнечные лучи, которые молекулами воздуха в изобилии отражаются к нам перед восходом и после заката Солнца, образуют рассвет и вечерние сумерки, распространяясь на угловое расстояние, превышающее $20^g$ [18°], от этого светила. Это доказывает, что самые высокие молекулы атмосферы находятся на высоте, по меньшей мере, 60 000 м.

Если бы глаз мог различать и относить на их истинные места точки внешней поверхности атмосферы, мы видели бы небо как шаровой сегмент, образованный частью этой поверхности, отрезанной плоскостью, касательной к Земле. А так как высота атмосферы очень мала по сравнению с земным радиусом, небо представлялось бы нам в виде пониженного свода. Хотя мы не можем разглядеть пределы атмосферы, но так как лучи, которые она нам посылает, на горизонте приходят из большей глубины чем в зените, мы должны считать, что она протяженнее в горизонтальном направлении. К этому присоединяется еще то, что наличие предметов между нами и горизонтом увеличивает расстояние до той части неба, которая находится далее линии горизонта. Поэтому нам небо должно казаться пониженным, подобно шаровому сегменту. Небесное светило, находящееся на высоте около $26^g$ [23°], кажется делящим на две равные части длину кривой, образуемой сечением поверхности неба вертикальной плоскостью от горизонта до зенита. Отсюда следует, что, если эта кривая есть дуга окружности, горизонтальный радиус видимого небесного свода относится к его вертикальному радиусу приблизительно как $3^1/_4$ к 1. Но это отношение изменяется вместе с причинами этой иллюзии. Видимые размеры Солнца и Луны, пропорциональные углам, под которыми мы их видим, и кажущимся расстояниям точек неба, к которым мы их относим, на горизонте кажутся нам большими, чем в зените, хотя на горизонте они видны под меньшими углами.[17]

Световые лучи в атмосфере проходят не по прямым направлениям. Они непрерывно отклоняются к Земле. Наблюдатель, видящий предметы только в направлении касательной к кривой, которую они описывают, усматривает их выше, чем они находятся па самом деле, и небесные светила видны на горизонте тогда, как они еще находятся под ним. Отклоняя лучи Солнца, атмосфера позволяет нам дольше наслаждаться его присутствием и удлиняет день, который делается еще длиннее благодаря зорям. Астрономам было очень важно знать законы и величину рефракции света в нашей атмосфере, чтобы получать истинные положения небесных тел. Но прежде чем представить результаты их изысканий по этому предмету, я в немногих словах изложу основные свойства света.

Проходя из одной прозрачной среды в другую, световой луч приближается или отдаляется от перпендикуляра к разделяющей их поверхности таким образом, что синусы двух углов, образованных направлениями луча с этим перпендикуляром, одного до входа в новую среду, а другого — после, находятся в постоянном отношении, каковы бы ни были эти углы. Но свет, преломляясь подобным образом, порождает замечательное явление, позволившее нам познать его природу. Луч солнечного света, полученный

в темной комнате, после прохождения через прозрачную призму образует продолговатое изображение, окрашенное в различные цвета. Этот луч представляет собой пучок бесконечного числа лучей разных цветов, которые призма разделяет в силу их различной преломляемости. Наиболее преломляемый луч — фиолетовый, затем синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Но хотя мы указываем здесь только семь цветов лучей, их существует целая бесконечность, незаметно переходящих один в другой по цвету и преломляемости. Все эти лучи, собранные линзой, снова дают белый солнечный свет, который, таким образом, представляет собой смесь всех простых, или однородных, цветов, взятых в определенных пропорциях.

Если луч однородного цвета хорошо отделен от других лучей, он уже не изменяет ни своей преломляемости, ни цвета, каковы бы ни были преломления и отражения, испытываемые им. Значит, его цвет не является результатом изменения света той средой, через которую он проходит, а связан с его природой. Однако тождество цвета еще не означает тождества света. Смешивая вместе несколько различно окрашенных лучей Солнца, разложенных призмой, можно образовать цвет, подобный одному из простых цветов. Так смешение однородных желтого и красного цветов производит оранжевый, подобный однородному оранжевому. Однако преломление лучей такой смеси при новом прохождении через призму снова их разделяет на составляющие цвета, тогда как однородные оранжевые лучи остаются неизменными.

Лучи света, встречаясь с поверхностью зеркала, отражаются, образуя с перпендикуляром к его поверхности углы отражения, равные углам падения.

Преломление и отражение солнечных лучей в каплях дождя порождают радугу, объяснение которой, основанное на строгом расчете и точно удовлетворяющее во всех деталях этому любопытному явлению, есть один из выдающихся результатов физики.

Большинство тел разлагает падающий на них свет: одна часть его поглощается, а другая отражается во всех направлениях, и тело кажется красным, синим, зеленым и т. д. в зависимости от цвета отраженных им лучей. Так, белый солнечный свет, разливаясь по всей природе, разлагается и отражает к нашим глазам бесконечное разнообразие цветов.

После этого короткого отступления о природе света я возвращаюсь к астрономической рефракции. Рефракция света в воздухе почти независима от его температуры и пропорциональна его плотности. Переходя из пустоты в воздух с температурой тающего льда и под давлением, измеренным высотой ртути в барометре, равной 0.76 м, световой луч преломляется так, что синус угла преломления относится к синусу угла падения как единица к 1.0002943321. Поэтому чтобы определить путь луча в атмосфере, достаточно знать закон распределения плотности в ее слоях. Но этот закон, зависящий от их температуры, очень сложен и изменяется в течение суток. Если положить, что температура атмосферы везде равна 0°, то, как было показано, плотность ее слоев убывает в геометрической прогрессии. Отсюда путем анализа можно найти, что при высоте

ртути в барометре, равной 0.76 м, рефракция на горизонте будет равна 7391$^{cc}$ [2395″]. Она была бы равна 5630$^{cc}$ [1823″], если бы плотность слоев уменьшалась в арифметической прогрессии и становилась равной нулю на поверхности атмосферы. Наблюдаемая горизонтальная рефракция, равная 6500$^{cc}$ [2106″], находится по середине между этими пределами. Таким образом, закон изменения плотности атмосферных слоев с высотой близок к промежуточному между этими прогрессиями. Приняв гипотезу, учитывающую обе прогрессии, можно достигнуть хорошего представления сразу всех наблюдений барометра и термометра по мере поднятия в атмосфере, а также астрономической рефракции, не прибегая, как это делали некоторые физики, к гипотезе об особой жидкости, смешанной с атмосферным воздухом и преломляющей свет.

Если видимая высота небесных светил под горизонтом превышает 11$^{g}$ [10°], рефракция зависит только от показаний барометра и термометра в месте наблюдения, и почти пропорциональна тангенсу видимого зенитного расстояния небесного светила, уменьшенного на произведение трех с четвертью на рефракцию, соответствующую этому расстоянию при температуре тающего льда и при высоте барометра, равной 0.76 м. Из сказанного следует, что при этой температуре и высоте барометра, равной 0.76 м, коэффициент, умножение которого на этот тангенс дает астрономическую рефракцию, равен 187.$^{cc}$24 [60.″60] и, что особенно замечательно, сравнение большого числа астрономических наблюдений приводит к такой же величине, которую поэтому можно считать очень точной. Но она изменяется с плотностью воздуха. Каждый градус температуры увеличивает объем воздуха на 0.00375, если принимать этот объем за единицу при температуре 0°. Следовательно, коэффициент 187.$^{cc}$24 [60.″60] надо разделить на единицу плюс произведение 0.00375 на число градусов температуры. Кроме того, при всех других равных условиях плотность воздуха пропорциональна высоте барометра. Поэтому этот коэффициент надо умножить на отношение этой высоты к 0.76 м, приведя столбик ртути к температуре 0°. С помощью этих данных можно составить точную таблицу рефракции, начиная от видимой высоты в 11$^{g}$ [10°] до зенита, т. е. в том интервале, в котором производятся почти все астрономические наблюдения. Эта таблица не будет зависима от любой гипотезы об уменьшении плотности атмосферных слоев, и она может служить как на вершинах самых высоких гор, так и на уровне моря. Но поскольку сила тяжести изменяется с высотой и широтой места, ясно, что при одной и той же температуре одинаковые высоты барометра не указывают на одинаковую плотность воздуха, и она должна быть меньше там, где сила тяжести меньше. Поэтому коэффициент 187.$^{cc}$24 [60.″60], определенный на параллели 50$^{g}$ [45°], на поверхности Земли должен меняться как сила тяжести. Следовательно, из него надо вычитать произведение 0.$^{cc}$53 [0.″14] на косинус удвоенной широты.

В таблице, о которой шла речь, предполагается, что состав атмосферы везде и во всякое время одинаков. Это было установлено опытами. Теперь известно, что наш воздух не представляет собой однородную суб-

станцию, а на 100 частей он содержит 79 частей азота и 21 часть кислорода — газа в высшей степени необходимого для горения тел и для дыхания животных, которое само есть медленное горение, главный источник тепла живых организмов. В атмосферном воздухе на 1000 частей содержится также 3 или 4 части углекислого газа. Воздух, взятый в различные времена года, в самых отдаленных странах, на самых высоких горах и даже еще больших высотах, был подвержен очень точному анализу, и в нем всегда находили в той же пропорции оба газа — азот и кислород. Легкая оболочка, заполненная водородом, самым разреженным из всех газов, вместе с привязанными к ней телами поднимается до тех пор, пока не встретит в атмосфере слой, достаточно разреженный, чтобы остаться там в равновесии. Таким способом, которым мы обязаны французским ученым, человек расширил свои владения и свое могущество. Он может устремиться в воздух, пройти облака и исследовать природу в высоких областях атмосферы, ранее нам не доступных. Самый полезный для науки подъем был осуществлен г-ном Гей-Люссаком, который поднялся на 7016 м над уровнем моря — самую большую высоту, которая до сих пор была достигнута. На этой высоте он измерил магнитную интенсивность и наклонение магнитной стрелки, которые он нашел такими же, как на поверхности Земли. В момент его отправления из Парижа, около десяти часов утра, высота барометра была 0,7652 м, термометр отмечал 30.°7 и волосяной гигрометр 60%. Пять часов спустя, в самой высокой точке подъема, те же приборы показывали: 0.3288 м, —9.°5 и 33%. Наполнив баллон воздухом из высоких слоев, г-н Гей-Люссак с большой тщательностью сделал анализ его и не обнаружил разницы между этим воздухом и воздухом из самых низких слоев атмосферы.

Прошло лишь около половины века, как астрономы ввели в таблицы рефракции высоту барометра и термометра. Стремление к исключительной точности, которую теперь стараются достичь в астрономических наблюдениях и инструментах, привело к желанию знать влияние влажности воздуха на его преломляющую силу и, если это необходимо, учитывать показания гигрометра. Чтобы дополнить непосредственные наблюдения, которых было мало в этой области, я исходил из гипотезы, что действие воды и ее паров на свет пропорционально их плотности, — гипотезы тем более правдоподобной, что гораздо более глубокие изменения в состоянии тел, чем переход из жидкого состояния в парообразное, не изменяют сколько-нибудь заметно отношение между их влиянием на свет и их плотностью. Приняв эту гипотезу, о преломлении света водяным паром можно судить по измеренному с большой точностью преломлению, которое испытывает луч света, переходя из воздуха в воду. Так, находим, что преломляющая способность водяного пара превышает таковую способность воздуха, приведенного к той же плотности; но при одинаковом давлении плотность воздуха превышает плотность пара почти в таком же отношении. Отсюда следует, что преломление, возникающее в водяных парах, рассеянных в атмосфере, близко к преломлению в воздухе, место которого эти пары занимают, и поэтому влияние влажности воздуха на его преломляющие свойства незаметно. Г-н Био подтвердил

этот результат путем непосредственных опытов, показавших, кроме того, что температура влияет на рефракцию только через производимое ею изменение плотности воздуха. Наконец, г-н Араго, применив очень хитроумный и точный способ, убедился в том, что влияние влажности воздуха на рефракцию неощутимо.

Предыдущая теория предполагает, что атмосфера совершенно спокойна, так что плотность воздуха на равных высотах над уровнем моря повсюду одинакова. Но ветер и неравенство температур нарушают это предположение и могут заметным образом действовать на рефракцию. Каковы бы ни были усовершенствования астрономических инструментов, влияние этих возмущающих причин, если оно существенно, всегда будет препятствием для достижения высшей точности наблюдений, число которых придется сильно увеличивать, чтобы это влияние преодолеть. К счастью, мы уверены, что это влияние не может превысить очень малое число секунд.*

Атмосфера ослабляет свет небесных тел, особенно на горизонте, где их лучи пересекают ее на большой протяженности. Из опытов Бугера следует, что если интенсивность света от небесного светила, находящегося в зените, при входе этого света в атмосферу и при показаниях барометра 0.76 м принять за единицу, то, дойдя до наблюдателя, она ослабляется до 0.8123. В этом случае, если бы атмосфера везде была одинаково плотной и имела температуру 0°, высота равнялась бы 7945 м. Естественно думать, что ослабление луча света, проходящего через атмосферу, будет таким же, как при этих гипотезах, так как он встречает на своем пути то же число молекул воздуха. Итак, слой воздуха толщиной 7945 м с указанной выше плотностью уменьшает силу света до 0.8123. Легко вывести ослабление света в слое воздуха такой же плотности и любой толщины, так как очевидно, что если интенсивность света уменьшается до одной четверти, пересекая данную толщу воздуха, то еще один слой такой же толщины уменьшит эту четверть до одной шестнадцатой первоначальной величины. Отсюда видно, что, если толщина слоя увеличивается в арифметической прогрессии, интенсивность света уменьшается в геометрической. Следовательно, логарифмы интенсивности пропорциональны толщине слоев. Итак, чтобы получить табличный логарифм интенсивности света, прошедшего слой воздуха некоторой толщины, надо умножить число —0.0902835 — табличный логарифм чи-

---

* Исследования физиков в области астрономической рефракции дают нам пример того, как опасны гипотезы, когда их принимают за действительность вместо того, чтобы рассматривать их как средство подвергнуть наблюдения вычислениям. Доминико Кассини при построении таблицы рефракции исходил из очень простого предположения о постоянной плотности атмосферы. Эта таблица, очень точная для тех высот, на которых почти всегда наблюдают небесные светила, была принята астрономами. Естественное стремление использовать привычные представления, привело к общему мнению, что, в соответствии с гипотезой Кассини, рефракция будет увеличиваться по мере того, как мы поднимаемся в атмосфере. Это мнение существовало до тех пор, пока Бугер не показал, сделав очень большое число наблюдений в Кито на высоте 2800 м над уровнем моря, что рефракция на этой высоте не только не увеличивается, но уменьшается.

сла 0.8123 — на отношение этой толщины к 7945 м, а если плотность больше или меньше, чем предыдущая, надо увеличить или уменьшить этот логарифм в той же пропорции.

Чтобы определить ослабление света небесных тел в зависимости от их высоты над горизонтом, можно вообразить световой луч движущимся в канале, и воздух, заключенный в нем, привести к рассматривавшейся выше плотности. Длина столба этого воздуха определит ослабление света рассматриваемого небесного светила. В пределах зенитных расстояний от $12^g$ [11°] до зенита можно допустить, что путь света от светила прямолинеен, и в этом интервале высот рассматривать слои атмосферы как плоские и параллельные. Тогда толщина каждого слоя в направлении светового луча относится к его толщине в вертикальном направлении как секанс видимого зенитного расстояния светила к радиусу. Поэтому, умножив этот секанс на —0.0902835 и на отношение высоты барометра к 0.76 м, затем разделив полученное произведение на единицу плюс число 0.00375, умноженное на число градусов термометра, мы получим логарифм интенсивности света рассматриваемого светила. Это очень простое правило дает ослабление интенсивности света на вершине гор и на уровне морей, что может быть полезно как для исправления наблюдений спутников Юпитера, так и для оценки интенсивности солнечного света в фокусе зажигательных стекол. Однако мы должны заметить, что пары, находящиеся в воздухе, значительно влияют на ослабление света. Ясное небо и разреженный воздух делают свет звезд более ярким на вершинах высоких гор, и если бы наши большие телескопы были перенесены на вершину Кордильер, несомненно были бы открыты некоторые небесные явления, которые более плотная и менее прозрачная атмосфера в наших странах делает невидимыми.

Интенсивность света небесных тел на очень малых высотах, так же как и его рефракция, зависят от высоких слоев атмосферы. Если бы ее температура была везде одинакова, логарифмы интенсивности света были бы пропорциональны астрономической рефракции, деленной на косинусы видимых высот, и тогда эта интенсивность на горизонте уменьшалась бы приблизительно до 1/4000 доли ее первоначальной величины. Именно поэтому Солнце, яркий свет которого можно лишь с трудом выносить в полдень, без труда смотрится на горизонте.

С помощью приведенных данных можно определить влияние нашей атмосферы на затмения. Преломляя солнечные лучи, которые пересекают атмосферу, она отклоняет их в теневой конус Земли, и, поскольку горизонтальная рефракция превосходит полусумму параллаксов Солнца и Луны, центр лунного диска, предполагаемый на оси этого конуса, от одной и той же точки поверхности Солнца получает лучи с двух сторон Земли. Поэтому если бы атмосфера не поглощала большую часть падающего на нее света, этот центр был бы освещен больше, чем в полнолуние. Из анализа приведенных выше данных следует, что, если за единицу взять свет в этой точке во время полнолуния, ее освещенность во время центральных затмений в апогее составит 0.02 и лишь 0.0036 или приблизительно в шесть раз меньше — во время перигейных центральных зат-

мений. Если же из-за необычайным образом сложившихся обстоятельств получится, что пары́ облаков поглотят значительную часть этого слабого света, когда он проходит атмосферу, чтобы пройти от Солнца к Луне, это последнее светило станет совсем невидимо. История астрономии дает нам несколько, правда очень редких, примеров полного исчезновения Луны во время ее затмений. Красный цвет Луны и Солнца на горизонте указывает нам, что земная атмосфера легче пропускает лучи этого цвета, который по этой же причине окрашивает Луну во время затмений.

Во время затмений Солнца производимая ими темнота уменьшается светом, отраженным земной атмосферой. В самом деле, предположим, что мы находимся на экваторе и что центры Солнца и Луны — в зените. Если Луна находится в перигее, а Солнце в апогее, темнота будет наиболее глубокой и продолжительность затмения будет около $5^1/_2$ мин. Диаметр тени, проецируемой на Землю, составит 0.022 диаметра Земли и будет в шесть с половиной раз меньше диаметра сечения атмосферы плоскостью горизонта, по крайней мере, если предположить высоту атмосферы равной 0.01 земного радиуса, что было выведено из продолжительности сумерек. Очень правдоподобно, что атмосфера посылает к нам заметные лучи с еще больших высот. Мы видим, таким образом, что Солнце освещает во время своих затмений наибольшую часть атмосферы, находящейся над горизонтом. Но она освещена только частью солнечного диска, увеличивающейся по мере удаленности атмосферных молекул от зенита. В этом случае солнечные лучи проходят бо́льшую толщу земной атмосферы, чтобы от Солнца прийти к этим молекулам и от них, путем отражения, достигнуть наблюдателя, и настолько ослабляются, что позволяют видеть звезды первой и второй величины. Окраска этих лучей, включающих голубизну неба и красноту сумерек, распространяет на все предметы мрачный свет, который вместе с внезапным исчезновением Солнца вселяет в животных страх.

# Книга вторая

# ОБ ИСТИННЫХ ДВИЖЕНИЯХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Гавань покинув, плывем; отступают селенья и берег.

Вергилий. Энеида, кн. III, 72.*

Мы изложили главные видимые движения небесных тел, и их сравнение побудило нас умозрительно заставить планеты двигаться вокруг Солнца, которое в своем движении вокруг Земли увлекает с собой фокусы их орбит. Но видимые явления были бы теми же, если бы Земля, как и все планеты, перемещалась бы вокруг Солнца. Тогда это светило было бы вместо Земли центром всех планетных движений.

Понятно, как важно для прогресса астрономии знать, какая из этих двух возможностей имеет место в природе. Руководствуясь индукцией и аналогиями, мы, сравнивая видимые явления, будем определять порождающие их истинные движения и постигать законы этих движений.

## Глава I

## О ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ЗЕМЛИ

Размышляя о суточном движении, которому подвержены все небесные тела, с очевидностью убеждаешься в существовании одной общей причины, которая их увлекает или представляется нам увлекающей их вокруг оси мира. Если учесть, что эти тела изолированы друг от друга и находятся далеко от Земли на очень различных расстояниях, что Солнце и звезды удалены от нее гораздо дальше, чем Луна, что вариации видимых диаметров планет указывают на большие изменения в их расстояниях от Земли и, наконец, что кометы свободно пересекают небо во всех направлениях, то очень трудно понять, как одна и та же причина сообщает всем этим телам общее вращательное движение. Но так как светила, увлекаемые небом вокруг неподвижной Земли, представлялись бы нам совершенно так же, как если бы Земля вращалась в противоположном направлении вокруг самой себя, кажется гораздо естественнее принять за действительное это последнее движение и рассматривать движение неба лишь как видимое.

Земля есть шар, радиус которого не достигает и 7 000 000 м. Солнце, как мы уже видели, несравненно больше. Если бы его центр совпадал с центром Земли, его объем заключил бы в себе орбиту Луны и протянулся бы еще на столько же дальше. Отсюда можно судить о его огром-

---

* Перевод С. Ошерова.

ных размерах. При этом Солнце удалено от нас приблизительно на 23 000 земных радиусов. Не бесконечно ли проще предположить, что Земля, на которой мы живем, вращается вокруг самой себя, чем воображать, что столь отдаленная и такая внушительная масса Солнца движется с чрезвычайной скоростью, необходимой, чтобы в одни сутки обернуться вокруг Земли? Какую огромную силу нужно было бы к ней приложить, чтобы удержать ее и уравновесить ее центробежную силу? А ведь подобные же трудности возникают и со всеми другими светилами. Однако все эти трудности исчезают, если предположить, что Земля вращается.

Мы уже видели раньше, что полюс экватора кажется нам медленно перемещающимся вокруг полюса эклиптики и что от этого возникает предварение равноденствий. Если Земля неподвижна, полюс экватора тоже должен быть неподвижен, потому что он соответствует всегда одной и той же точке на земной поверхности. Значит, небесная сфера движется вокруг полюсов эклиптики и в этом движении увлекает все небесные светила. Если бы это было так, целая система из множества тел, столь различных по их величине, движениям и расстояниям, была бы подчинена одному общему движению, которое исчезает и сводится к простой видимости, если предположить, что земная ось движется вокруг полюсов эклиптики.

Увлекаемые движением, общим для всего, что нас окружает, мы подобны мореплавателю, которого вместе с его судном ветер несет по морю. Ему кажется, что он неподвижен, а берега, горы и все, что находится вне его корабля, представляется ему движущимся. Но, сравнивая протяженность берегов и долин и высоту гор с малостью своего судна, он понимает, что их движение лишь кажущееся, порожденное его собственным реальным движением. Многочисленные небесные светила, рассеянные в небесном пространстве, по отношению к нам представляют то же, что берега и горы по отношению к мореплавателю. И те же соображения, по которым он убеждается в реальности своего движения, доказывают нам реальность движения Земли.

Аналогия подтверждает это доказательство. Почти у всех планет наблюдалось вращательное движение, и это движение направлено с запада на восток, т. е. подобно тому, которое, как будто, для Земли указывается суточным движением небесных светил.

Юпитер, будучи намного больше Земли, делает оборот вокруг своей оси менее чем за половину суток; и наблюдатель на его поверхности увидел бы, что за этот промежуток времени небо оборачивается вокруг него. Тем не менее это движение неба было бы только кажущимся. Не естественно ли думать, что то же самое имеет место при наблюдении с Земли? То, что Земля, так же как и Юпитер, сплюснута у полюсов, убедительно подтверждает эту аналогию. В самом деле, можно понять, что центробежная сила, стремящаяся удалить все части тела от оси его вращения, должна была понизить поверхность Земли у полюсов и приподнять ее на экваторе. Эта же сила, кроме того, должна была уменьшить силу тяжести на экваторе, и это уменьшение было подтверждено наблюдениями маятников. Все это заставляет нас считать, что Земля вращается вокруг

самой себя и суточное вращение неба — лишь иллюзия, вызванная этим вращением, иллюзия, похожая на ту, что небо представляется нам в виде голубого свода, к которому прикреплены все небесные светила, и поверхность Земли — как плоскость, на которую он опирается. Так астрономия преодолела обманы чувств, но только после того, как они были рассеяны большим числом наблюдений и вычислений. Человек, наконец, познал движение земного шара, на котором он живет, и его истинное положение во вселенной.

## Глава II

## О ДВИЖЕНИИ ЗЕМЛИ ВОКРУГ СОЛНЦА

Поскольку суточное вращение неба есть не что иное, как иллюзия, являющаяся результатом вращения Земли, естественно думать, что годичное обращение Солнца, уносящего с собой все планеты, точно так же есть только иллюзия, возникающая из-за перемещения Земли вокруг Солнца. Следующие соображения не оставляют в этом никакого сомнения.

Массы Солнца и многих планет значительно больше массы Земли. Поэтому гораздо проще предположить ее вращение вокруг Солнца, чем движение вокруг нее всей солнечной системы. Какие сложности в небесных движениях влечет за собой неподвижность Земли! Какие быстрые движения надо тогда предположить у Юпитера, у Сатурна, почти в десять раз больше удаленного, чем Солнце, у еще более удаленной планеты Уран, чтобы заставить их каждый год обращаться вокруг нас, тогда как они движутся вокруг Солнца. Эта сложность и эти огромные скорости движений исчезают, если принять мысль о поступательном движении Земли, движении, согласном с общим законом, по которому малые небесные тела обращаются вокруг соседних с ними больших тел.

Аналогия Земли с другими планетами подтверждает это движение. Подобно Юпитеру, она вращается вокруг себя и сопровождается спутником. Наблюдатель на поверхности Юпитера считал бы, что солнечная система вращается вокруг него, и размеры этой планеты делали бы эту иллюзию менее неправдоподобной, чем для Земли. Не естественно ли думать, что движение этой системы вокруг нас также является только кажущимся?

Перенесемся мысленно на поверхность Солнца и оттуда рассмотрим Землю и планеты. Все эти тела покажутся нам двигающимися с запада на восток, и уже это единообразие направлений есть указание на движение Земли. Но что с очевидностью на него указывает, это закон, связывающий время обращения планет с их расстоянием до Солнца. Они движутся вокруг него тем медленнее, чем дальше от него отстоят, так что квадраты времен их обращения вокруг Солнца относятся между собой как кубы их средних расстояний до него. Следуя этому замечательному закону, продолжительность обращения Земли вокруг Солнца, если пред-

положить, что она движется вокруг него, должна быть в точности равна звездному году. Не является ли это неопровержимым доказательством того, что Земля движется, как и все планеты, и что она подчиняется тому же закону? К тому же не странно ли предполагать, что земной шар, едва различимый с Солнца, стоит неподвижно среди планет, движущихся вокруг этого светила, которое в свою очередь вместе со всеми этими планетами движется вокруг Земли? Не должна ли сила, которая для удержания планет в своих орбитах уравновешивает их центробежную силу, равным образом воздействовать на Землю, и не следует ли, чтобы Земля противопоставляла этому воздействию такую же центробежную силу? Таким образом, рассмотрение планетных движений, видимых с Солнца, не оставляет никаких сомнений в действительном движении Земли. Но наблюдатель, находящийся на ней, имеет, сверх того, еще одно веское доказательство этого движения в явлении аберрации, которое есть его необходимое следствие, что мы сейчас изложим.

В конце прошлого века Рёмер обратил внимание на то, что затмения спутников Юпитера происходят раньше во время противостояний этой планеты и позже при ее соединениях. Это заставило его предположить, что свет, распространяющийся от этих светил, доходит до Земли не мгновенно, а затрачивает некоторое ощутимое время, чтобы пересечь орбиту Солнца. В самом деле, Юпитер находится к нам ближе во время противостояний, чем во время соединений, на величину диаметра солнечной орбиты; в первом случае затмения должны происходить для нас раньше, чем во втором, на время, затрачиваемое светом для пересечения солнечной орбиты. Закон запаздывания этих затмений так точно отвечает этой гипотезе, что от нее невозможно отказаться. В результате получено, что свет затрачивает 571 с [$493^s$], чтобы пройти от Солнца до Земли.[18]

Неподвижный наблюдатель увидел бы светила в направлении их лучей. Но этого не произойдет, если предположить, что он движется вместе с Землей. Чтобы свести это к случаю неподвижного наблюдателя, достаточно перенести на светила их свет и на самого наблюдателя его собственное движение, но в противоположном направлении, что не изменит видимого положения светил, так как в силу общего закона оптики, если сообщить всем телам некоторой системы общее движение, не произойдет никакого изменения их видимых положений. Теперь представим себе, что в момент, когда луч входит в земную атмосферу, ему сообщают, как воздуху и Земле, движение, равное, но противоположное движению наблюдателя, и посмотрим, какие явления это движение должно произвести в видимом положении светила, от которого исходит этот световой луч. Здесь можно не учитывать перемещение, вызванное вращательным движением Земли, которое даже на экваторе почти в 60 раз меньше, чем движение Земли вокруг Солнца. Можно также без ощутимой ошибки предположить, что все световые лучи, посылаемые к нам каждой точкой поверхности диска светила, параллельны друг другу и лучу, который соединял бы центр светила и центр Земли, если бы она была прозрачной. Тогда явления, которые мог бы увидеть наблюдатель, помещенный в этот последний центр, и которые зависят от сочетания движений света

и Земли, были бы почти одинаковыми для всех наблюдателей, расположенных по поверхности Земли. Наконец, мы отвлечемся здесь от небольшого эксцентриситета земной орбиты. При принятых условиях в промежутке 571 с [$493^s$], который затрачивается светом на то, чтобы пройти радиус земной орбиты, Земля описывает на этой орбите небольшую дугу, равную $62{,}^{cc}5$ [$20{,}''2$]. Из законов сложения движений следует, что если вообразить небольшую окружность, проведенную через центр звезды параллельно эклиптике с диаметром, измеряемым на небе дугой в $125^{cc}$ [$40.''5$], направление луча света, сложенное с движением Земли, взятым в обратном направлении, встречает эту окружность в точке, где она пересекается плоскостью, проведенной через центры звезды и Земли по касательной к земной орбите. Поэтому звезда должна казаться движущейся по этой окружности и описывать ее каждый год так, что она постоянно на $100^g$ [90°] отстает от Солнца на его видимой орбите.

Это явление тождественно описанному нами в XIII главе первой книги изложению наблюдений Брадлея, которому мы обязаны этим открытием и объяснением его причины. Чтобы отнести звезды к их истинным положениям, достаточно поместить их в центр малой окружности, которую, как нам кажется, они описывают. Итак, их годичное движение — не что иное, как иллюзия, производимая сочетанием движений света и Земли. Его соотношение с положением Солнца уже могло бы привести к предположению, что это годичное движение лишь кажущееся, но предыдущее объяснение наглядно демонстрирует движение Земли вокруг Солнца, так же как увеличение градусов и силы тяжести при переходе от экватора к полюсам делает ощутимым ее вращательное движение.

Аберрация света искажает положения Солнца, планет, спутников и комет, по различным образом, в зависимости от особенностей их движений. Чтобы исключить эти искажения и получить истинные положения светил, приложим в каждый момент к каждому телу движение, равное по величине движению Земли, но противоположное по направлению; Земля тогда станет неподвижной. Как мы уже говорили, это не изменит ни взаимного расположения светил, ни их видимых положений. Итак, ясно, что светило, в момент, когда мы его наблюдаем, уже не находится в направлении светового луча, пришедшего от него к нам. Оно уже удалилось вследствие своего собственного движения в сочетании с движением Земли, которое мы переносим на него в обратном направлении. Сочетание этих двух движений, наблюдаемых с Земли, образует видимое движение, называемое *геоцентрическим движением.* Поэтому истинное положение небесного светила можно получить, прибавив к его наблюденной геоцентрической широте и долготе его геоцентрическое движение по широте и долготе за промежуток времени, затрачиваемый светом, чтобы дойти от светила до Земли. Так, центр Солнца нам всегда кажется отстающим на своей орбите на $62.^{cc}5$ [$20.''2$] по сравнению с его положением, которое наблюдалось бы, если бы свет распространялся мгновенно.

Аберрация изменяет видимое соотношение небесных явлений как в пространстве, так и во времени. Поэтому в тот момент, как мы их еще наблюдаем, этих явлений уже нет. Мы замечаем конец затмения спутни-

ков Юпитера только через 25—30 мин [36—43$^{m}$] после того, как оно закончилось в действительности, а изменения переменных звезд происходят на несколько лет раньше, чем мы их наблюдаем. Но поскольку все причины этих иллюзий нам хорошо известны, мы всегда можем отнести явления солнечной системы к их истинному месту и времени.

Итак, рассмотрение небесных движений привело нас к необходимости умозрительно перенести Землю из центра вселенной, где мы предполагали ее местонахождение, обманутые иллюзиями и свойственной человеку склонностью считать себя главным объектом природы. Земной шар, на котором он обитает, есть планета, вращающаяся вокруг самой себя и вокруг Солнца. Если рассматривать ее с этой точки зрения, все явления объясняются самым простым образом, законы небесных движений становятся общими и все аналогии соблюдаются. Так же как Юпитер, Сатурн и Уран, Земля имеет спутника, она вращается вокруг своей оси, как Венера, Марс, Юпитер, Сатурн и, вероятно, все другие планеты; она, как и они, заимствует свой свет от Солнца и движется вокруг него в том же направлении и по тем же законам. Наконец, идея о движении Земли подтверждается простотой, аналогией и вообще всем, что характеризует истинную систему природы. Мы увидим в дальнейшем, прослеживая эту идею в ее проявлениях, что небесные явления во всвех, даже самых малых, деталях приводятся к одному единственному закону, необходимым следствием которого они являются. Движение Земли приобретает, таким образом, ту несомненность, характерную для физических истин, которая может быть результатом либо большого числа и разнообразия объясненных явлений, либо следствием простоты законов, от которых эти явления зависят. Никакая ветвь естественных наук не объединяет эти преимущества в большей степени, чем теория мироздания, основанная на движении Земли.

Это движение увеличивает вселенную в наших глазах. Для измерения расстояний до небесных тел оно дает нам огромную базу, такую как диаметр земной орбиты. С ее помощью с высокой точностью были определены размеры планетных орбит. Так, движение Земли, которое из-за вызываемых им иллюзий, долгое время задерживало познание истинных движений планет, затем позволило нам их узнать с большей точностью, чем если бы мы находились в фокусе этих движений. Между тем годичный параллакс звезд, или угол, под которым из их центра был бы виден диаметр земной орбиты, неощутим и не превышает $6^{cc}$ [$2''$] даже для звезд, которые, благодаря своему яркому блеску, кажутся находящимися ближе всего к Земле. Поэтому они по крайней мере, в 200 000 раз дальше от нас, чем Солнце. Такое огромное расстояние вместе с их большой яркостью с очевидностью доказывают нам, что они не заимствуют свой свет от Солнца, как планеты и их спутники, но светятся своим собственным светом. Таким образом, они являются такими же солнцами, рассеянными в беспредельности пространства, и могут, подобно нашему Солнцу, быть центрами других планетных систем. В самом деле, достаточно оказаться на самом ближайшем из этих светил, чтобы увидеть Солнце не более как светящимся небесным телом с видимым диаметром меньше $1/30^{cc}$ [$0.''01$].

Огромные расстояния до звезд приводят к заключению, что их движения по прямому восхождению и склонению — лишь иллюзии, производимые движением оси вращения Земли.[19] Но некоторые звезды обнаруживают и собственные движения, и очень вероятно, что они все находятся в движении так же, как Солнце, которое переносит с собой в пространстве всю систему планет и комет, подобно тому, как каждая планета увлекает свои спутники в своем движении вокруг Солнца.

## Глава III

## О КАЖУЩИХСЯ ЯВЛЕНИЯХ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМЛИ

С той точки зрения, к которой привело нас сравнение небесных явлений, рассмотрим небесные светила и покажем полное тождество их появления с тем, что мы наблюдаем. Независимо от того, небо ли вращается вокруг оси мира, или Земля вертится вокруг самой себя в направлении, обратном кажущемуся движению неподвижного неба, ясно, что все светила будут представляться нам одинаковым образом. Разница будет лишь в том, что в первом случае они будут последовательно проходить над различными меридианами, а во втором случае эти меридианы будут проходить под ними.

Так как движение Земли является общим для всех тел, расположенных на ней, а также и для флюидов, которые покрывают эти тела, их относительные движения будут такими же, как и движения, если бы Земля была неподвижной. Так, на корабле, перемещающемся с равномерной скоростью, все движется так, как если бы он был неподвижен. Предмет, брошенный вертикально снизу вверх, падает в точку, из которой он был брошен. На корабле его путь представляется вертикальным, но с берега он виден как наклонный к горизонту и описывающий параболическую кривую. Однако если тело, падающее с высокой башни, предоставить силе тяжести, оно не упадет точно в той точке, в которой отвес, опущенный из исходной точки падения, встречает поверхность Земли, а немного к востоку от нее, поскольку реальная скорость, вызванная вращением Земли, у основания этой башни несколько меньше, чем у ее вершины. Анализ показывает, что отклонение точки падения происходит только на восток, оно пропорционально квадратному корню из куба высоты башни и косинусу широты и на экваторе равно 21.952 мм на 100 м высоты. Таким образом, посредством очень точных опытов с падениями тел можно обнаружить вращательное движение Земли. Результаты опытов, уже поставленных в Германии и в Италии, достаточно хорошо сходятся с вышеописанными данными, но так как проведение опытов требует особой тщательности, их надо повторить еще с большей точностью. Вращение Земли на ее поверхности проявляется главным образом через центробежную силу, которая сжимает земной сфероид у полюсов и уменьшает силу тяжести на экваторе — два явле-

ния, которые мы узнали из измерений длины маятника и градусов земного меридиана.

При обращении Земли вокруг Солнца ее центр и все точки, лежащие на оси ее вращения, двигаются с равными и параллельными скоростями, так что эта ось все время остается параллельной самой себе. Мысленно сообщая в каждый момент небесным телам и всем частям Земли движение, равное и противоположное движению ее центра, мы сделаем эту точку неподвижной, как и ось вращения. Но это сообщенное движение не влияет на видимое движение Солнца. Надо только перенести на это светило в обратном направлении истинное движение Земли. Видимые явления, таким образом, будут одинаковыми в предположении, что Земля неподвижна и движется вокруг Солнца. Чтобы более детально проследить тождественность этих видимых явлений, представим себе луч, проведенный из центра Солнца в центр Земли. Этот луч перпендикулярен плоскости, отделяющей освещенную часть Земли от неосвещенной. В точке, где этот луч пересекает поверхность Земли, Солнце находится вертикально над ней, и во всех точках земной параллели, которую этот луч встречает последовательно в силу вращения Земли, в полдень Солнце тоже будет в зените. Но поскольку все равно, Солнце ли движется вокруг Земли или Земля движется вокруг Солнца и вокруг самой себя, ее ось вращения сохраняет всегда положение, параллельное самой себе, и ясно, что этот луч описывает на поверхности Земли одну и ту же кривую; в обоих случаях он пересекает одинаковые земные параллели, когда Солнце имеет одинаковую видимую долготу, поэтому Солнце одинаково поднимается в полдень над горизонтом, и соответствующие дни имеют одинаковую продолжительность. Таким образом, сезоны и дни будут такими же, как при допущении, что Солнце неподвижно, так и при допущении, что оно обращается вокруг Земли. Объяснение сезонов, данное нами в предыдущей книге, приложимо также и к первой гипотезе.

Все планеты движутся в одинаковом направлении вокруг Солнца, но с разными скоростями. Продолжительности их обращения возрастают в большем отношении, чем их расстояния от этого светила. Юпитер, например, проходит свою орбиту почти за двенадцать лет, хотя ее радиус только приблизительно в пять раз больше радиуса земной орбиты. Значит, его реальная скорость меньше скорости Земли. Это уменьшение скорости планет по мере их удаления от Солнца свойственно всем планетам начиная от Меркурия — самой близкой к Солнцу планеты и кончая самой удаленной — Ураном.[20] Оно вытекает из закона, который мы вскоре установим, а именно; средние скорости планет обратны квадратным корням из их средних расстояний до Солнца.

Рассмотрим планету, орбита которой находится внутри орбиты Земли, и проследим ее от верхнего соединения до нижнего. Ее видимое или геоцентрическое движение представляет результат ее истинного движения в сочетании с перенесенным на нее в обратном направлении движением Земли. В верхнем соединении истинное движение планеты обратно движению Земли, поэтому ее геоцентрическое движение равно сумме этих двух движений и имеет то же направление, что и геоцентрическое дви-

жение Солнца, вытекающее из движения Земли, перенесенного на это светило в обратном направлении. Таким образом, движение планеты является прямым. В нижнем соединении движение планеты имеет то же направление, что и у Земли, и так как оно больше, геоцентрическое движение сохраняет прежнее направление, следовательно, обратное видимому движению Солнца. В это время движение планеты попятное. Нетрудно понять, что при переходе от прямого движения к попятному она должна казаться неподвижной, или стационарной, и что это должно иметь место между наибольшей элонгацией и нижним соединением, когда геоцентрическое движение планеты, являющееся результатом ее истинного движения и движения Земли, приложенного в обратном направлении, направлено по лучу зрения к планете. Эти явления полностью согласуются с наблюдавшимися движениями Меркурия и Венеры.

Движение планет, орбиты которых включают в себя земную орбиту, во время противостояний имеет то же направление, что и движение Земли, но оно меньше и поэтому, складываясь с земным движением, взятым в обратном направлении, принимает направление, обратное истинному. Поэтому геоцентрическое движение этих планет тогда делается попятным. Прямое же движение бывает во время соединений, подобно тому как у Меркурия и Венеры — во время верхних соединений.

Мысленно перенеся движение Земли в обратном направлении на звезды, мы увидим, что они каждый год описывают окружность, равную и параллельную земной орбите. Диаметр этой окружности стягивает угол, под которым из центров звезд виден диаметр земной орбиты. Это видимое движение имеет много общего с движением, возникающим при сложении движений Земли и света, из-за чего нам кажется, что звезды ежегодно описывают окружности, параллельные эклиптике, диаметр которых измеряется углом в $125^{cc}$ [40.″5]. Но эти движения различаются тем, что звезды на первой окружности имеют такое же положение, как и Солнце, а на второй окружности их положения отстают от Солнца на $100^{g}$ [90°]. Это дает возможность разделять оба движения, и это же показывает, что первое из них из-за огромного расстояния до звезд крайне мало, так как угол, под которым виден диаметр земной орбиты с этого расстояния, почти неощутим.

Так как ось мира есть лишь продолжение оси вращения Земли, к этой последней оси надо относить движение полюсов небесного экватора, на которое указывают прецессия и нутация, описанные в главе XIII первой книги. Итак, одновременно с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца ее ось имеет медленное движение вокруг полюсов эклиптики, совершая очень незначительные колебания с периодом, равным периоду движения узлов лунной орбиты. В остальном это движение не является особенностью движения Земли. В главе IV первой книги мы уже видели, что ось Луны с тем же периодом движется вокруг полюсов эклиптики.

## Глава IV

## О ЗАКОНАХ ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ ВОКРУГ СОЛНЦА И О ФИГУРЕ ИХ ОРБИТ

Ничего не было бы легче, чем, исходя из предыдущих данных, вычислить положения планет для любого момента, если бы их движения вокруг Солнца были бы круговыми и равномерными. Но они подвержены очень заметным неравенствам, законы которых являются одним из важных предметов астрономии и единственной нитью, могущей привести нас к познанию общих принципов небесных движений. Чтобы распознать эти законы по видимым движениям планет, эти движения надо освободить от эффектов, создаваемых движением Земли, а положения, наблюденные из разных точек земной орбиты, отнести к Солнцу. Следовательно, прежде всего надо определить размеры этой орбиты и законы движения Земли.

В главе II первой книги было сказано, что видимая орбита Солнца есть эллипс, в одном из фокусов которого находится Земля. Но поскольку в действительности Солнце неподвижно, его следует поместить в фокусе эллипса, а Землю — на его периферии. При этом видимое движение Солнца останется таким же, а чтобы получить положение Земли, видимой из центра Солнца, достаточно изменить положение этого светила на два прямых угла.

Мы видели также, что Солнце кажется движущимся по своей орбите таким образом, что радиус-вектор, соединяющий центры Солнца и Земли, описывает вокруг нее площади, пропорциональные времени, но в действительности эти площади описываются вокруг Солнца. В общем, все, что мы сказали в упомянутой главе об эксцентриситете солнечной орбиты и его изменениях, о положении этой орбиты и движении ее перигея, должно быть применено к земной орбите, с учетом лишь того, что перигелий Земли находится на расстоянии двух прямых углов от перигея Солнца. Узнав таким образом форму земной орбиты, посмотрим, как оказалось возможным определить форму орбит других планет. Для примера возьмем планету Марс, которая, благодаря большому эксцентриситету своей орбиты и близости к Земле, очень подходит для открытия законов движения планет.

Орбита Марса и его движение вокруг Солнца были бы известны, если бы для любого момента мы знали угол, который его радиус-вектор составляет с неподвижной прямой, проходящей через центр Солнца, и длину этого радиуса. Чтобы упростить эту задачу, выбирают положения Марса, в которых одна из этих двух величин проявляется отдельно, что бывает почти точно в противостояниях, когда мы видим эту планету в той же точке эклиптики, в какую мы отнесли бы ее, наблюдая из центра Солнца. Разность движений Марса и Земли приводит к тому, что Марс в своих последовательных противостояниях оказывается в разных точках неба. Поэтому, сравнивая между собой большое число наблюденных противостояний Марса, можно открыть закон, связывающий время и угловое движение Марса вокруг Солнца, движение, которое

называется *гелиоцентрическим.* Для этого имеются различные методы, которые упрощаются в настоящем случае, если учесть, что, поскольку главные неравенства Марса неизменно повторяются при каждом его звездном обращении, их совокупность может быть выражена быстро сходящимся рядом синусов углов, кратных его движению, рядом, коэффициенты коего легко определяются с помощью нескольких специально выбранных наблюдений.

Закон, выражающий длину радиуса-вектора Марса, можно получить, сравнивая наблюдения этой планеты вблизи ее квадратур, где этот радиус-вектор представляется нам под самым большим углом. В треугольнике, образованном прямыми, соединяющими центры Земли, Солнца и Марса, непосредственные наблюдения дают угол при Земле. Закон гелиоцентрического движения Марса дает угол при Солнце, а радиус-вектор Марса вычисляется в долях радиуса-вектора Земли, который в свою очередь выражен в долях среднего расстояния от Земли до Солнца. Сравнение большого числа радиусов-векторов, определенных таким способом, позволит выявить закон их изменений, соответствующих углам, образованным ими с неподвижной прямой, и построить фигуру орбиты.

Кеплер, пользуясь очень похожим методом, обнаружил удлиненность орбиты Марса. Ему пришла счастливая мысль сравнить ее фигуру с эллипсом, поместив Солнце в один из его фокусов. Наблюдения Тихо Браге, в точности представляемые эллиптической орбитой, не оставили у него никаких сомнений в достоверности этой гипотезы.

*Перигелием* называют конец большой оси эллипсов, находящийся ближе к Солнцу, а *афелием* — более отдаленный ее конец. В перигелии угловая скорость Марса относительно Солнца самая большая. Затем, по мере удлинения радиуса-вектора, она уменьшается и становится самой малой в афелии. Сравнивая эту скорость со степенями радиуса-вектора, находим, что она обратна квадрату его длины, так что произведение суточного гелиоцентрического движения Марса на квадрат его радиуса-вектора всегда одинаково. Это произведение равно удвоенному малому сектору, описываемому ежедневно радиусом-вектором вокруг Солнца. Площадь, описываемая им, начиная от неподвижной прямой, проходящей через центр Солнца, увеличивается в зависимости от числа суток, прошедших с тех пор, когда планета была на этой прямой. Поэтому площади, описанные радиусом-вектором Марса, пропорциональны времени.

Эти законы движения Марса, открытые Кеплером, будучи тождественны законам видимого движения Солнца, описанным во II главе первой книги, в равной степени применимы к движению Земли. Естественно было распространить их и на другие планеты. Итак, Кеплер установил как фундаментальные законы движения этих тел два нижеследующих закона, подтвержденных всеми наблюдениями:

орбиты планет суть эллипсы, в одном из фокусов которых находится центр Солнца;

площади, описываемые вокруг этого центра радиусом-вектором планет, пропорциональны времени, затраченному на их описание.

Этих законов достаточно для определения движения планет вокруг Солнца. Но для каждой планеты нужно знать семь величин, называемых *элементами эллиптического движения.* Пять из этих элементов, относящихся к эллиптическому движению, таковы: 1) продолжительность звездного обращения; 2) большая полуось орбиты, или среднее расстояние планеты от Солнца; 3) эксцентриситет, от которого зависит самое большое уравнение центра; 4) средняя долгота планеты на данную эпоху; 5) долгота перигелия на ту же эпоху. Два других элемента относятся к положению орбиты: 1) долгота в данную эпоху узлов орбиты, или тех точек, где она пересекается с плоскостью, за которую обычно принимают эклиптику; 2) наклон орбиты к этой плоскости.

Итак, для семи планет, известных к началу нашего века, надо определить сорок девять элементов. Следующая таблица представляет эти элементы на первый момент этого века, т. е. на полночь среднего парижского времени 1 января 1801 г. Рассмотрение этой таблицы показывает, что продолжительности обращения планет возрастают с увеличением их средних расстояний до Солнца. Кеплер долго искал соотношение между этими периодами и расстояниями. После большого числа попыток, проводившихся в течение семнадцати лет, он наконец установил, что:

квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших осей их орбит.

Таковы законы движения планет, законы фундаментальные, которые изменили облик астрономии и привели к открытию всемирного тяготения.

Планетные эллипсы не остаются неизменными. Их большие оси представляются всегда одними и теми же. Но их эксцентриситеты, наклонности к постоянной плоскости, положения их узлов и перигелиев подвержены изменениям, которые, как будто, до сих пор возрастают пропорционально времени. Эти изменения, которые становятся заметными только по прошествии ряда веков, получили название *вековых неравенств.* Нет никакого сомнения в их существовании. Но современные наблюдения недостаточно отдалены друг от друга, а древние — недостаточно точны, чтобы точно определить эти вековые неравенства.

Замечены еще периодические неравенства, возмущающие эллиптические движения планет. Так, у Земли оно немного изменено, поскольку, как мы уже видели, видимое эллиптическое движение Солнца кажется нам измененным. Но эти неравенства особенно заметны у двух больших планет — Юпитера и Сатурна. Сравнивая современные наблюдения с древними, астрономы заметили уменьшение периода обращения у Юпитера и увеличение его у Сатурна. Сравнение современных наблюдений между собой дает противоположный результат, что, по-видимому, указывает на присутствие в движениях этих планет больших неравенств с очень длинными периодами. В прошлом веке продолжительность обращения Сатурна казалась различной в зависимости от точек орбиты, от которых отсчитывали его движение. Возвращения планеты были более быстрыми в весенних равноденствиях, чем в осенних. Наконец, движе-

ния Юпитера и Сатурна испытывают доходящие до нескольких минут неравенства, которые, по-видимому, зависят от положения этих планет как относительно друг друга, так и относительно их перигелиев.

Итак, все говорит о том, что в планетной системе, независимо от главной причины, приводящей планеты в движение по эллиптическим

### Таблица эллиптического движения планет

Продолжительность звездного обращения

| | |
|---|---|
| Меркурий | $87^{d}9692580$ |
| Венера | 224.7007869 |
| Земля | 365.2563835 |
| Марс | 686.9796458 |
| Юпитер | 4332.5848212 |
| Сатурн | 10 759.2198174 |
| Уран | 30 686.8208296 |

Большие полуоси орбит, или средние расстояния от Солнца

| | |
|---|---|
| Меркурий | 0.3870981 |
| Венера | 0.7233316 |
| Земля | 1.0000000 |
| Марс | 1.5236923 |
| Юпитер | 5.202776 |
| Сатурн | 9.5387861 |
| Уран | 19.182390 |

Отношение эксцентриситета к большой полуоси в начале 1801 г.

| | |
|---|---|
| Меркурий | 0.20551494 |
| Венера | 0.00686074 |
| Земля | 0.01685318 |
| Марс | 0.0933070 |
| Юпитер | 0.0481621 |
| Сатурн | 0.0561505 |
| Уран | 0.0466108 |

Средняя долгота в полночь, разделявшую 31 декабря 1800 г. и 1 января 1901 г. по среднему парижскому времени

| | | |
|---|---|---|
| Меркурий | $182^{g}15647$ | [$163^{\circ}94082$] |
| Венера | 11.93259 | [10.73933] |
| Земля | 111.28179 | [100,15361] |
| Марс | 71.24071 | [64.11664] |
| Юпитер | 124.68251 | [112.21426] |
| Сатурн | 150.35354 | [135.31819] |
| Уран | 197.55589 | [177.80030] |

Средняя долгота перигелия в ту же эпоху

| | | |
|---|---|---|
| Меркурий | $82^{g}6256$ | [$74^{\circ}3630$] |
| Венера | 143.0349 | [128.7314] |
| Земля | 110.5571 | [99.5014] |
| Марс | 369.3323 | [332.3991] |
| Юпитер | 12.3810 | [11.1429] |
| Сатурн | 99.0647 | [89.1582] |
| Уран | 186.1500 | [167.5350] |

Наклон орбиты к эклиптике в начале 1801 г.

| | | |
|---|---|---|
| Меркурий | $7^{g}78058$ | [$7^{\circ}00252$] |
| Венера | 3.76807 | [3.39126] |
| Земля | 0.00000 | [0.00000] |
| Марс | 2.05746 | [1.85171] |
| Юпитер | 1.46029 | [1.31426] |
| Сатурн | 2.77029 | [2.49326] |
| Уран | 0.86063 | [0.77457] |

Долгота восходящего узла в начале 1801 г.

| | | |
|---|---|---|
| Меркурий | $51^{g}0651$ | [$45^{\circ}9586$] |
| Венера | 83.2262 | [74.9036] |
| Земля | 0.0000 | [0.0000] |
| Марс | 53.3344 | [48.0010] |
| Юпитер | 109.3762 | [98.4386] |
| Сатурн | 124.3819 | [111.9437] |
| Уран | 81.1035 | [72.9932] |

орбитам вокруг Солнца, существуют еще особые причины, возмущающие их движения и изменяющие с течением времени элементы их эллипсов.

Пока нельзя с достаточной точностью получить элементы орбит недавно открытых четырех малых планет: время, в течение которого их наблюдали, еще слишком мало. Кроме того, значительные возмущения, испытываемые ими, еще не определены. Вот эллиптические элементы, которые до сих пор удовлетворяют наблюдениям, но которые не следует рассматривать иначе, как первый вклад в теорию этих планет.

Продолжительность звездного обращения

| | |
|---|---|
| Церера | $1681^{d}.3931$ |
| Паллада | 1686.5388 |
| Юнона | 1592.6608 |
| Веста | 1325.7431 |

Большая полуось орбиты

| | |
|---|---|
| Церера | 2.767245 |
| Паллада | 2.772886 |
| Юнона | 2.669009 |
| Веста | 2.36787 |

Отношение эксцентриситета к большой полуоси

| | |
|---|---|
| Церера | 0.078439 |
| Паллада | 0.241648 |
| Юнона | 0.257848 |
| Веста | 0.089130 |

Средняя долгота в полночь начала 1820 г.

| | | |
|---|---|---|
| Церера | $136^{g}.8461$ | [123°.1615] |
| Паллада | 120.3422 | [108.3080] |
| Юнона | 222.3989 | [200.1590] |
| Веста | 309.2917 | [278.3625] |

Долгота перигелия в ту же эпоху

| | | |
|---|---|---|
| Церера | $163^{g}.4727$ | [147°.1254] |
| Паллада | 134.5754 | [121.1179] |
| Юнона | 59.5142 | [53.5628] |
| Веста | 277.2853 | [249.5568] |

Наклон орбиты к эклиптике

| | | |
|---|---|---|
| Церера | $11^{g}.8044$ | [10°.6240] |
| Паллада | 38.4244 | [34.5820] |
| Юнона | 14.5215 | [13.0694] |
| Веста | 7.9287 | [7.1358] |

Долгота восходящего узла в начале 1810 г.

| | | |
|---|---|---|
| Церера | $87^{g}.6557$ | [78°.8901] |
| Паллада | 191.8416 | [172.6574] |
| Юнона | 190.1421 | [171.1279] |
| Веста | 114.6908 | [103.2217] |

## Глава V

## О ФОРМЕ КОМЕТНЫХ ОРБИТ И ЗАКОНАХ ДВИЖЕНИЯ КОМЕТ ВОКРУГ СОЛНЦА

Поскольку Солнце находится в фокусе планетных орбит, естественно предположить, что оно подобным же образом располагается и в фокусе орбит комет. Но эти небесные светила, появившись самое большее на

несколько месяцев, исчезают, их орбиты, в отличие от близких к окружности планетных орбит, сильно вытянуты, и Солнце расположено вблизи той их части, в которой комета делается видимой. Однако эллипс, изменяясь от окружности до параболы, может представить эти разнообразные орбиты. Поэтому аналогия побуждает нас считать, что кометы движутся по эллипсам, в одном из фокусов которых расположено Солнце, а движение их происходит по тем же законам, что и движения планет, так что площади, описываемые их радиусами-векторами, пропорциональны времени.

Почти невозможно узнать период обращения кометы и, следовательно, длину большой оси ее орбиты по наблюдениям лишь одного ее появления. Поэтому нельзя точно определить, какую площадь описывает радиус-вектор за данный промежуток времени. Но следует иметь в виду, что малая часть эллипса, описанная кометой за время ее появления, может быть тождественна параболе и что таким способом можно вычислить ее движение в этом интервале, как если бы орбита была параболической.

В соответствии с законами Кеплера секторы, описанные радиусами-векторами двух планет за одинаковое время, относятся друг к другу как площади их эллипсов, деленные на времена обращения, и квадраты этих времен — как кубы больших полуосей. Вообразив планету, движущуюся по круговой орбите с радиусом, равным перигельному расстоянию кометы, нетрудно заключить, что сектор, описанный радиусом-вектором кометы, будет относиться к сектору, описанному радиусом-вектором этой планеты, как квадратный корень из афельного расстояния кометы к квадратному корню из большой полуоси ее орбиты; это отношение при переходе эллипса в параболу становится отношением корня квадратного из двух к единице. Так получается отношение сектора кометы к сектору воображаемой планеты, и на основе предыдущего легко получить отношение этого сектора к тому, который за это же время описывает радиус-вектор Земли. Таким путем для любого момента, отсчитанного от момента прохождения кометы через перигелий, можно определить площадь, описанную ее радиусом-вектором, и установить положение кометы на параболе, которую она предположительно описывает. Из наблюдений необходимо лишь получить элементы параболического движения, т. е. перигельное расстояние кометы в долях среднего расстояния от Солнца до Земли, положение перигелия, момент прохождения через перигелий, наклон орбиты к эклиптике и положение ее узлов. Отыскание этих пяти элементов таит в себе больше трудностей, чем определение соответствующих элементов планетных орбит, так как планеты видны всегда, и их можно наблюдать в положениях, наиболее благоприятных для определения нужных элементов, тогда как кометы появляются на очень непродолжительное время и почти всегда в условиях, когда их видимое движение очень усложнено действительным движением Земли, которое мы передаем на них в обратном направлении. Несмотря на эти трудности, элементы кометных орбит все же удалось определить, применяя различные методы. Для их получения

более чем достаточно трех полных наблюдений. Все остальные служат для подтверждения точности этих элементов и правильности теории, изложенной выше. Многочисленные наблюдения более чем ста комет в точности подтверждают эту теорию и делают ее неуязвимой. Итак, кометы, долгое время принимавшиеся за метеоры, — это небесные тела, подобные планетам; их движения управляются теми же законами, что и движения планет.

Рассмотрим здесь, как по мере своего развития истинная система природы подтверждается все больше и больше. Простота небесных явлений при допущении, что Земля движется, по сравнению с их исключительной сложностью при допущении о ее неподвижности делает первое допущение очень вероятным. Законы эллиптического движения, общие для всех планет, включая Землю, сильно увеличивают эту вероятность, которая делается еще более значительной при рассмотрении движения комет, подчиняющихся тем же законам.

Эти светила не все движутся в одном направлении, как планеты. Одни из них имеют прямое истинное движение, другие — обратное. Наклоны их орбит не заключены, как у планет, в узкую зону. Они являют собой все разнообразие наклонов — от орбиты, лежащей в плоскости эклиптики, до орбиты, ей перпендикулярной.

Когда комета появляется снова, ее узнают по соответствию элементов ее орбиты элементам уже наблюденной кометы. Если перигельное расстояние, положение перигелия и узлов и наклонность орбиты приблизительно те же, то очень вероятно, что появившаяся комета есть именно та, которую уже ранее наблюдали, и что после удаления на расстояние, где комета была невидимой, она возвращается на участок орбиты, близкий к Солнцу. Так как периоды обращения комет очень велики, и эти светила наблюдались достаточно тщательно лишь в течение последних двух веков, к настоящему времени точно известны периоды обращения только двух комет. Одна из них — комета 1759 г., которую наблюдали уже в 1682, 1607 и 1531 гг. Эта комета возвращается к своему перигелию приблизительно через семьдесят шесть лет. Таким образом, взяв за единицу среднее расстояние от Земли до Солнца, получаем длину большой оси ее орбиты около 35.9; так как ее перигельное расстояние равно лишь 0.58, она, двигаясь по очень эксцентричному эллипсу, удаляется от Солнца, по меньшей мере, в 35 раз дальше, чем Земля. Ее возвращение к перигелию было на 13 месяцев продолжительнее между 1531 и 1607 гг., чем между 1607 и 1682 гг., и на 18 месяцев короче между 1607 и 1682 гг., чем между 1682 и 1759 гг. Поэтому представляется, что причины, подобные тем, которые изменяют эллиптическое движение планет, в еще большей степени возмущают движение комет.[21]

Орбита одной кометы в 1818 г. имела элементы, столь близкие к элементам кометы, наблюдавшейся в 1805 г., что был сделан вывод об их идентичности, но это дало бы короткий период обращения, равный 13 годам, если только не было промежуточного возвращения кометы к своему перигелию. Однако г-н Энке путем исследования многочисленных наблюдений этого светила, выполненных в 1818 и 1819 гг., выяс-

нил, что ее период еще короче и близок к 1203 суткам. Он заключил, что она должна вновь появиться в 1822 г. и, чтобы облегчить наблюдателям возможность ее нахождения, вычислил положения этой кометы на каждый день ее будущего появления. Южные склонения кометы делали ее наблюдение в Европе в это появление почти невозможным. К счастью, комету опознал г-н Рюмкер, искусный наблюдатель, привлеченный в Новую Голландию генералом Брисбейном, губернатором Ботани-Бея, который, сам являясь прекрасным наблюдателем, способствовал успехам астрономии своим деятельным и просвещенным участием. Г-н Рюмкер наблюдал комету каждый день с 2 по 23 июня 1822 г., и ее наблюденные положения так хорошо согласовывались с вычисленными г-ном Энке, что не должно оставаться никаких сомнений в ее возвращении, предсказанном г-ном Энке.

Туманность, которая почти всегда окружает комету, по-видимому, состоит из паров, поднимающихся с ее поверхности под влиянием солнечного тепла. В самом деле, понятно, что сильный жар, испытываемый кометами в перигелии, должен разрежать материю, сгущенную холодом, в который они погружены в афелии. Этот жар непомерно велик для комет, у которых перигельное расстояние очень мало. Так, комета 1680 г. была в своем перигелии в 166 раз ближе к Солнцу, чем Земля, и, следовательно, должна была испытывать воздействие жара в 27 500 раз большего, чем тот, что Солнце передает Земле, если, как все заставляет предполагать, солнечное тепло пропорционально интенсивности его света. Этот великий жар, гораздо больший, чем мы в состоянии произвести, испарил бы, по всей вероятности, большинство земных веществ.

Наблюдая кометы в сильные телескопы в условиях, когда мы должны были бы видеть лишь часть их освещенной полусферы, мы не обнаруживаем у них фаз. Только одна комета 1682 г., как показалось Гевелию и Лаиру, имела фазу. В дальнейшем мы увидим, что массы комет чрезвычайно малы. Диаметры их дисков должны быть очень малыми, и то, что мы называем ядром кометы, состоит, по-видимому, в большей части из более плотных слоев туманности, которая их окружает. Так, Гершель в очень сильный телескоп сумел разглядеть в ядре кометы 1811 г. яркую точку, которую он с достаточным основанием счел самим диском кометы. Эти слои все же очень разрежены, поскольку иногда через них видны звезды.

Хвосты, которые кометы тянут за собой, по-видимому, состоят из самых летучих молекул, поднятых с их поверхности теплом Солнца и удаленных от нее бесконечно далеко давлением солнечных лучей.[22] Это следует из направления этих шлейфов, образованных парáми, всегда отнесенных от головы кометы в сторону, противоположную Солнцу, увеличивающихся по мере приближения кометы к этому светилу и достигающих максимума лишь после прохождения перигелия. Так как исключительная малость молекул увеличивает отношение их поверхностей к массам, давление солнечных лучей может сделаться ощутимым и заставить почти каждую молекулу описывать гиперболическую орбиту, в фокусе второй ветви которой находится Солнце. Шлейф из молекул,

движущихся по этим кривым от головы кометы, образует светящийся хвост, противолежащий Солнцу и несколько наклоненный в ту сторону, которую комета покидает, двигаясь по своей орбите. Это именно то, что нам показывают наблюдения. Быстрота, с которой увеличиваются эти хвосты, позволяет судить о скорости выделения молекул. Можно понять, что разница в их летучести, величине и плотности должна производить значительные изменения в описываемых ими кривых, а это вносит большое разнообразие в форму, длину и ширину кометных хвостов. Сочетая эти эффекты с теми, которые могут происходить от вращательного движения этих светил, и с иллюзиями годичного параллакса, можно понять причины своеобразных явлений, представляемых туманностями и хвостами комет.

Хотя размеры кометных хвостов достигают многих миллионов мириаметров,* они не ослабляют заметно свет наблюдаемых сквозь них звезд. Следовательно, они чрезвычайно разрежены, и их массы, вероятно, меньше, чем массы самых маленьких гор на Земле; поэтому при встрече с Землей они не могут произвести никакого заметного действия. Очень вероятно, что они уже много раз обволакивали ее, не будучи замеченными. Состояние атмосферы в сильной степени влияет на видимую длину и ширину кометных хвостов. Между тропиками они кажутся гораздо большими, чем в наших странах. Пенгре говорил, что он наблюдал в хвосте кометы 1769 г. звезду, которая очень скоро из него удалилась. Но это кажущееся явление было лишь иллюзией, произведенной легкими облаками в нашей атмосфере, достаточно плотными, чтобы задержать слабый свет этого хвоста, но все же настолько прозрачными, чтобы позволить увидеть гораздо более яркий свет звѐзды. Невозможно приписать молекулам пара, из которых состоят эти хвосты, такие быстрые колебания, размеры которых превышали бы миллион мириаметров.

Так как количество испаряемых веществ кометы уменьшается с каждым ее возвращением к перигелию, после нескольких возвращений они должны полностью рассеяться в пространстве, и тогда комета будет представлять собою только постоянное ядро. Это должно быстрее происходить с кометами, период обращения которых короче. Можно предположить, что комета 1682 г., обращение которой равно лишь 76 годам, до сих пор единственная, у которой подозревалось существование фаз, приближается к этому стабильному состоянию. Если ядро слишком мало, чтобы быть обнаруженным, или, если испаряемого вещества, оставшегося на его поверхности, недостаточно, чтобы сформировать при испарении заметную голову кометы, светило сделается навсегда невидимым. Может быть, в этом причина того, что возвращения комет так редки. Может быть, по этой же причине исчезла для нас комета 1770 г., описавшая во время своего появления эллипс, в котором период обращения равен всего пяти с половиной годам; если эта комета продолжала его описывать, с тех пор она, по крайней мере, семь раз возвращалась к своему

* 1 мириаметр=10 км (Прим. перев.).

перигелию. Наконец, может быть, по этой же причине некоторые кометы, путь которых можно было проследить на небе по элементам их орбит, исчезли раньше, чем этого можно было ожидать.

## Глава VI

## О ЗАКОНАХ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВ ВОКРУГ ИХ ПЛАНЕТ

В IV главе первой книги мы изложили законы движения спутника Земли. Нам остается теперь рассмотреть законы движения спутников Юпитера, Сатурна и Урана.

Если взять за единицу экваториальный полудиаметр Юпитера, предполагаемый равным 56.$^{cc}$702 [18.″37] на среднем расстоянии этой планеты от Солнца, средние расстояния спутников от центра Юпитера и время их звездного обращения будут:

| | Среднее расстояние [в долях экваториального радиуса планеты] | Время обращения |
|---|---|---|
| I спутник | 6.04853 | 1$^{d}$769137788148 |
| II спутник | 9.62347 | 3.551181017849 |
| III спутник | 15.35024 | 7.154552783970 |
| IV спутник | 26.99835 | 16.688769707084 |

Продолжительность синодического обращения спутников или промежутков между средними соединениями с Юпитером легко вывести из продолжительности сидерического обращения спутников и Юпитера.[23] Сравнивая их средние расстояния с периодами обращения, мы вновь видим великолепное соотношение, которое, как мы уже знаем, существует между периодами обращения планет и их средними расстояниями от Солнца, а именно, что квадраты времен сидерического обращения спутников относятся между собой как кубы их средних расстояний от центра Юпитера.

Частые затмения спутников дали астрономам способ проследить их движение с такой точностью, которую нельзя достигнуть из наблюдений их углового расстояния от Юпитера. Они позволили узнать следующее.

Эллиптичность орбиты первого спутника неощутима. Ее плоскость почти совпадает с плоскостью экватора Юпитера, наклон которого к орбите этой планеты равен 4.$^{g}$4352 [3.°9917].

Эллиптичность орбиты второго спутника также незаметна. Ее наклон к плоскости орбиты Юпитера непостоянен, так же как и положение ее узлов. Все эти изменения можно приблизительно представить, если предположить, что плоскость орбиты спутника наклонена к плоскости экватора Юпитера на 5152$^{cc}$ [1669″], и придать ее узлам в этой плоскости попятное движение с периодом в 30 юлианских лет.

Небольшая эллиптичность наблюдается у орбиты третьего спутника. Ближайший к Юпитеру конец ее большой оси, называемый *перийовием*,

имеет прямое, но неравномерное движение. Эксцентриситет орбиты также подвержен очень заметным изменениям. К концу прошлого века уравнение центра было максимально и достигло почти $2458^{cc}$ [796″]. Затем оно стало уменьшаться и вблизи 1777 г. было минимальным, около $949^{cc}$ [307″]. Наклон орбиты этого спутника к орбите Юпитера и положение ее узлов непостоянны: почти все их изменения можно представить, предположив орбиту спутника наклонной к плоскости экватора Юпитера примерно на $2284^{cc}$ [740″] и ее узлы движущимися в обратном направлении в плоскости экватора с периодом в 142 года. Однако астрономы, определявшие по затмениям этого спутника наклон экватора Юпитера к плоскости его орбиты, постоянно находили его на девять или десять минут меньшим, чем по затмениям первого и второго спутников.

Орбита четвертого спутника имеет очень заметную эллиптичность. Ее перийовий имеет прямое годовое движение около $7959^{cc}$ [2579″]. Эта орбита наклонена к орбите Юпитера приблизительно на $2.7^{g}$ [2.°4]. Из-за этого наклона четвертый спутник часто проходит позади планеты относительно Солнца, не затмеваясь. Со времени открытия спутников и до 1760 г. этот наклон казался постоянным, и годичное движение узлов по орбите Юпитера было прямое, равное $788^{cc}$ [255″]. Но с 1760 г. наклон увеличился, а годичное движение уменьшилось на заметную величину. Мы еще вернемся ко всем этим изменениям после того, как установим их причину.

Независимо от этих изменений спутники подвержены неравенствам, возмущающим их эллиптическое движение и делающим их теорию весьма сложной. Они особенно заметны у трех первых спутников, движения которых находятся в особенно примечательных соотношениях.

Сравнивая периоды их обращений, мы видим, что период обращения первого спутника равен приблизительно половине периода второго, который в свою очередь близок к половине периода третьего. Таким образом, средние угловые движения этих трех спутников следуют приблизительно половинной прогрессии. Если бы они точно следовали ей, то среднее движение первого спутника в сумме с удвоенным движением третьего было бы строго равно утроенному движению второго спутника. Но это равенство точнее, чем сама прогрессия, так что его можно рассматривать как точное, отнеся очень малые отклонения от него за счет ошибок наблюдений. Можно утверждать, что оно сохранится, по крайней мере, в течение длительного ряда веков.

Другой не менее странный результат, с такою же точностью полученный из наблюдений, заключается в том, что со времени открытия спутников средняя долгота первого без утроенной средней долготы второго плюс удвоенная такая же долгота третьего никогда не отличалась от двух прямых углов больше, чем на почти неощутимую величину.

Эти два результата относятся также к средним движениям и средним синодическим долготам. Так как синодическое движение спутника — не что иное, как избыток его сидерического движения над планетным, то, если в предыдущих результатах сидерические движения заменить синодическими, среднее движение Юпитера исключится, и эти результаты

останутся прежними. Отсюда следует, что, по крайней мере, в течение большого числа лет три первых спутника Юпитера не будут затмеваться одновременно, но при одновременных затмениях второго и третьего спутников первый всегда будет в соединении с Юпитером. Он же будет всегда в оппозиции во время одновременных затмений Солнца, производимых на Юпитере двумя другими спутниками.

Периоды и законы главных неравенств этих спутников одни и те же. В своем максимуме неравенство первого ускоряет или задерживает его затмения на 223.5 с [193.$^s$1]. Сравнивая ход этого неравенства с взаимными положениями двух первых спутников, нашли, что оно исчезает, когда эти спутники, видимые из центра Юпитера, одновременно находятся в противостоянии с Солнцем. Затем оно увеличивается и становится самым большим, когда первый спутник в момент своего противостояния оказывается на $50^g$ [45°] впереди второго. Потом неравенство снова приближается к нулю, когда опережение равно $100^g$ [90°]. С этого момента оно меняет знак, задерживает затмения и увеличивается, пока расстояние между спутниками не достигает $150^g$ [135°]. При этом неравенство имеет максимальное отрицательное значение. Далее оно снова уменьшается и исчезает при расстоянии в $200^g$ [180°]. Наконец, во второй половине обращения неравенство изменяется по тем же законам, что и в первой. Отсюда пришли к заключению, что в движении первого спутника вокруг Юпитера существует неравенство, достигающее в максимуме 5050.$^{cc}$6 [1636.″4] и пропорциональное синусу удвоенного избытка средней долготы первого спутника над средней долготой второго, избытка, равного разности средних синодических долгот этих двух спутников. Период этого неравенства не превосходит четырех суток. Но каким же образом в затмениях первого спутника он превращается в период 437.6592 суток? Мы это сейчас объясним.

Предположим, что первый и второй спутники вместе выходят из своих средних оппозиций к Солнцу. После каждого оборота, описанного первым спутником, вследствие его среднего синодического движения он снова окажется в своей средней оппозиции. Если представить себе воображаемое светило, у которого угловое движение равно избытку среднего синодического движения первого спутника над удвоенным таким же движением второго, то удвоенная разность средних синодических движений двух спутников во время затмения первого из них будет равна целому числу оборотов плюс движение воображаемого светила. Поэтому синус этого последнего движения будет пропорционален неравенству первого спутника во время его затмений и может его представлять. Его период равен времени обращения воображаемого светила, времени, которое по средним синодическим движениям двух спутников равно 437.6592 суткам. Так оно определяется с большей точностью, чем по непосредственным наблюдениям.

Неравенство второго спутника следует закону, подобному закону неравенства первого, с той лишь разницей, что всегда имеет обратный знак. При своем максимальном значении оно ускоряет или задерживает затмения на 1059.2 с [915.$^s$1]. Сравнивая его с взаимным положением

двух спутников, видим, что оно исчезает, когда они одновременно находятся в противостоянии с Солнцем, потом все больше и больше задерживает затмения второго спутника, пока оба спутника не разойдутся на $100^g$ [90°] в момент затмения второго спутника. Это запаздывание затем уменьшается и становится равным нулю, когда взаимное расстояние двух спутников равно $200^g$ [180°], и, наконец, после этого затмения начинают смещаться вперед во времени, таким же образом, как до этого запаздывали. Из этих наблюдений можно заключить, что в движении второго спутника присутствует неравенство с максимумом в $11920.^{cc}7$ [3862.″3], пропорциональное взятому с обратным знаком синусу избытка средней долготы первого спутника над средней долготой второго, избытка, равного разности средних синодических движений обоих спутников.

Если оба спутника вместе выходят из их средней оппозиции к Солнцу, второй вследствие своего среднего синодического движения будет оказываться в средней оппозиции после каждого описанного им оборота. Если вообразить, как и раньше, светило, угловое движение которого равно избытку среднего синодического движения первого спутника над удвоенным движением второго, разность средних синодических движений двух спутников во время затмений второго будет равна целому числу окружностей плюс движению воображаемого светила. Поэтому неравенство второго спутника во время его затмений будет пропорционально синусу углового движения этого воображаемого светила. Отсюда видно, почему закон этого неравенства и его период одинаковы с выведенными нами для первого спутника.

Влияние первого спутника на неравенство второго очень вероятно. Но если третий производит в движении второго неравенство, подобно тому, которое, как будто, второй производит в движении первого, т. е. пропорциональное синусу удвоенной разности средних долгот второго и третьего спутников, это новое неравенство соединится с неравенством, вызванным первым спутником, так как в силу зависимости, имеющейся между средними долготами первых трех спутников, изложенной нами выше, разность средних долгот первых двух спутников равна полуокружности плюс удвоенная разность средних долгот первого и третьего спутников, так как синус первой разности равен синусу удвоенной второй разности, но с обратным знаком. Поэтому неравенство, производимое третьим спутником в движении второго, имело бы тот же знак и следовало бы тому же закону, что и неравенство, наблюдаемое в движении второго спутника. Поэтому очень вероятно, что это неравенство есть результат двух неравенств, зависящих от первого и третьего спутников. Если бы с течением веков отмеченные соотношения между средними долготами этих трех спутников перестали существовать, эти два неравенства, в настоящее время объединенные, разделились бы и путем наблюдений можно было бы определить их величины по отдельности. Но мы уже видели, что это соотношение должно существовать очень долго, и в четвертой книге увидим, что оно совершенно строгое.

Наконец, неравенство третьего спутника, во время его затмений сопо-

ставленное с соответствующими положениями второго и третьего спутников, показывает, что и здесь существуют те же зависимости, какие имели место при сравнении неравенства второго спутника с соответствующими положениями первого и второго. Следовательно, в движении третьего спутника существует неравенство, пропорциональное синусу избытка средней долготы второго спутника над средней долготой третьего, неравенство, которое в своем максимуме равно $808^{cc}$ [262″]. Если представить себе светило, угловое движение которого равно избытку среднего синодического движения второго спутника над удвоенным средним синодическим движением третьего, то неравенство третьего спутника при его затмениях становится пропорциональным синусу движения этого воображаемого светила. Таким образом, неравенство третьего спутника во время его движений имеет тот же период и подчиняется тем же законам, что и неравенства первых двух спутников.

Таков ход главных неравенств трех первых спутников Юпитера, предугаданный Брадлеем и затем опубликованный Варгентином. Взаимное соответствие этих неравенств, а также средних движений и средних долгот этих спутников, как будто, создает особую систему из этих трех тел, движимых, по всей видимости, общими силами, являющимися источником их общности.

Рассcмотрим теперь спутники Сатурна. Если взять за единицу экваториальный полудиаметр этой планеты, видимый на ее среднем расстоянии от Солнца и полагаемый равным $25^{cc}$ [8″], средние расстояния спутников от ее центра и времена их сидерических обращений будут следующими.

| | Среднее расстояние | Время обращения |
|---|---|---|
| I | 3.351 | $0^{d}$94271 |
| II | 4.300 | 1.37024 |
| III | 5.284 | 1.88780 |
| IV | 6.819 | 2.73948 |
| V | 9.524 | 4.51749 |
| VI | 22.081 | 15.94530 |
| VII | 64.359 | 79.32960 |

Сопоставляя время обращения спутников с их средними расстояниями от центра Сатурна, мы вновь находим прекрасное соотношение, открытое Кеплером для планет, которое, как мы уже видели, существует в системе спутников Юпитера, а именно, что квадраты времен обращения спутников Сатурна относятся между собой как кубы их средних расстояний от центра этой планеты.

Большая отдаленность спутников Сатурна и трудность наблюдения их положений не позволили обнаружить эллиптичность их орбит и, тем более, неравенства в их движениях. Однако эллиптичность орбиты шестого спутника все же заметна.[24]

Возьмем теперь за единицу полудиаметр Урана, предположив что он, видимый на среднем расстоянии планеты от Солнца, равен $6^{cc}$ [2″]. Тогда, по наблюдениям Гершеля, средние расстояния спутников от центра Урана и время их звездного обращения будут следующими.

| | Среднее расстояние | Время обращения |
|---|---|---|
| I | 13.120 | $5^d8926$ |
| II | 17.022 | 8.7068 |
| III | 19.845 | 10.9611 |
| IV | 22.752 | 13.4559 |
| V | 45.507 | 38.0750 |
| VI | 91.008 | 107.6944 |

Эти времена обращения, за исключением второго и четвертого спутников, были выведены из наибольших наблюденных элонгаций и из закона, по которому квадраты времен обращения спутников относятся как кубы их средних расстояний от центра планеты, закона, который подтверждается наблюдениями второго и четвертого спутников, единственных хорошо известных. Таким образом, закон этот надо рассматривать как всеобщий закон движения системы тел, обращающихся вокруг общего центра.

Каковы же главные силы, удерживающие планеты, их спутники и кометы на своих орбитах? Какие особые силы возмущают их эллиптическое движение? Какие причины заставляют отступать равноденствия и колебаться оси вращения Земли и Луны? Наконец, какими силами вода в морях поднимается два раза в сутки? Предположение об одном общем начале, от которого зависят все эти законы, достойно простоты и величия природы. Общность законов, представляющих движение небесных тел, по-видимому, указывает на существование такого начала. Его проявление предугадывается уже в связи этих явлений с соответствующим расположением тел солнечной системы. Но чтобы обнаружить его с полной очевидностью, необходимо знать законы движения материи.

# Книга третья

# О ЗАКОНАХ ДВИЖЕНИЯ

В самом же деле, в морях, на Земле и в небесных высотах
Многоразличным путем совершается много движений
Перед глазами у нас.

Лукреций. О природе вещей, кн. I, 340—342.*

В бесконечном разнообразии явлений, непрерывно сменяющих друг друга в небесах и на Земле, мы распознали небольшое число основных законов, которым в своих движениях следует материя. Все подчиняется им в природе, все вытекает из них с такой же необходимостью, как смена времен года. Кривая, описанная легким атомом, который уносится ветром, казалось бы, по воле случая, на самом деле управляется этими законами с такой же определенностью, как и орбиты планет. Важность этих законов, от которых мы постоянно зависим, должна была бы возбуждать любопытство во все времена. Но из-за обычного для человеческого ума безразличия они не привлекли к себе внимания до начала предпоследнего века, эпохи, в которую Галилей наметил первые основания науки о движении своими прекрасными открытиями в области падения тел. Геометры, идя по его следам, свели наконец всю механику к общим формулам, которые не требуют теперь больше ничего, как лишь усовершенствования математического анализа.

## Глава I

## О СИЛАХ, ИХ СЛОЖЕНИИ И О РАВНОВЕСИИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Тело представляется нам движущимся, если оно меняет свое положение по отношению к системе тел, которую мы считаем неподвижной. Так, на равномерно движущемся корабле тела кажутся нам движущимися, если они оказываются последовательно в разных его частях. Это движение лишь относительное, так как корабль движется по поверхности моря, которое вращается вокруг земной оси, а центр Земли обращается вокруг Солнца, которое само вместе с Землей и планетами уносится в пространство. Чтобы понять, где же предел этих движений, и чтобы прийти к неподвижным точкам, от которых можно было бы отсчитывать абсолютные движения тел, воображают беспредельное и неподвижное пространство, проницаемое для материи. К частям этого пространства, реального или идеального, мы и относим мысленно положения тел. И мы считаем их движущимися, если они последовательно находятся в разных частях этого пространства.

Сущность этого своеобразного изменения, в силу которого тело переносится из одного места в другое, нам неизвестна и никогда не будет

* Перевод Ф. А. Петровского.

известна. Она была обозначена названием *сила,* и мы можем лишь определять ее влияние и законы ее действия.

Если ей ничего не противопоставляется, результат влияния силы на материальную точку выражается в том, что ей сообщается движение. Направление силы есть прямая, по которой она перемещает эту точку. Ясно, что если две силы действуют в одном направлении, они прибавляются одна к другой, а если они действуют в противоположных направлениях, точка движется только благодаря их разности и останется неподвижной, если силы равны.

Если направления двух сил образуют между собой какой-либо угол, их равнодействующая примет среднее направление. С помощью одной только геометрии доказывается, что если из точки приложения сил провести представляющие их прямые и затем построить на этих отрезках параллелограмм, то его диагональ представит направление и величину результирующей силы.

Две составляющие силы можно заменить одной равнодействующей или, наоборот, одну какую-либо силу разложить на две, для которых она будет равнодействующей. Следовательно, одну силу можно разложить на две составляющие, параллельные двум взаимно перпендикулярным осям, лежащим в плоскости этой силы. Для этого достаточно через начало прямой, представляющей эту силу, провести две линии, параллельные этим осям, и образовать на этих линиях прямоугольник, у которого эта прямая будет диагональю. Тогда две стороны этого прямоугольника представят силы, на которые может быть разложена исходная сила параллельно осям.

Если сила наклонена к заданной плоскости, то, отложив в направлении этой силы от точки, где она встречает эту плоскость, представляющий ее отрезок и опустив из его конца на плоскость перпендикуляр, получим составляющую исходной силы, перпендикулярную этой плоскости. Проведенная в ней прямая, соединяющая силу и перпендикуляр, будет составляющей параллельной плоскости. Эта вторая, частная сила сама может быть разложена на две другие, параллельные двум взаимно перпендикулярным осям, расположенным в той же плоскости. Таким образом, всякая сила может быть разложена на три составляющие, параллельные трем взаимно перпендикулярным осям.

Отсюда рождается простой способ получения равнодействующей любого числа сил, действующих на материальную точку, так как, разлагая каждую из них на три другие, параллельные трем заданным взаимно перпендикулярным осям, все силы, параллельные каждой из осей, сводим к одной, равной сумме тех, которые действуют в одном направлении, без суммы сил, действующих в противоположном направлении. Таким образом, точка будет подвержена действию трех взаимно перпендикулярных сил, и, если по направлению каждой из них отложить ее величину от общего начала и на отложенных отрезках построить прямоугольный параллелепипед, его диагональ представит по направлению и величине равнодействующую всех сил, приложенных к данной точке.

Каковы бы ни были число, величина и направление этих сил, если каким-либо способом положение точки было изменено на бесконечно ма-

лую величину, произведение равнодействующей на величину перемещения в ее направлении равно сумме произведений каждой силы на соответствующую ей величину. Величина, на которую точка перемещается в направлении силы, есть проекция прямой, соединяющей два положения точки, на направление силы. Эта величина считается отрицательной, если точка перемещается в направлении, обратном направлению силы.

Если точка свободна, то в состоянии равновесия равнодействующая всех сил равна нулю. Если это не так, равнодействующая сила должна быть перпендикулярна к поверхности или кривой, где находится эта точка, и тогда, если изменять положение точки на бесконечно малую величину, произведение равнодействующей на перемещение в ее направлении равно нулю. Таким образом, это произведение вообще равно нулю, независимо от того, точка свободна или связана с кривой или плоскостью. Итак, во всех случаях, когда имеет место равновесие, при изменении положения точки на бесконечно малую величину сумма произведений каждой силы на перемещение точки в ее направлении равна нулю, и равновесие продолжает существовать, если это условие выполнено.

## Глава II

## О ДВИЖЕНИИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Покоящееся тело не может сообщить себе самому никого движения, так как не содержит в себе причины, побуждающей его двигаться в некотором направлении предпочтительнее, чем в другом. Если оно было подвергнуто действию какой-либо силы и затем предоставлено самому себе, оно движется непрерывно и равномерно в направлении действия этой силы, если не встречает никакого сопротивления, т. е. в каждый момент его сила и направление его движения одинаковы. Это стремление материи сохранять свое состояние движения или покоя называется *инерцией*. В этом состоит первый закон движения тел.

Движение по прямой линии следует, очевидно, из того, что нет никакой причины, чтобы точка отклонялась скорее направо, чем налево от своего начального направления. Но равномерность ее движения не так очевидна. Поскольку природа действующей силы неизвестна, невозможно знать *a priori*, должна ли эта сила непрерывно сохраняться. Однако поскольку тело не может само себе сообщить движение, представляется, что оно равным образом не способно изменить уже полученное им движение, поэтому закон инерции, по меньшей мере, самый естественный и самый простой из всех, какие можно себе представить. К тому же, он подтверждается опытом. В самом деле, на Земле мы наблюдаем, что движения сохраняются тем дольше, чем меньше противодействующих им препятствий. Это приводит нас к мысли, что в отсутствие препятствий тела двигались бы вечно. Но инерция материи очевидна главным образом в небесных движениях, которые за много веков не претерпели заметных изменений. Поэтому мы будем рассматривать инерцию как общий закон

природы и, если мы наблюдаем изменение в движении тела, будем предполагать, что оно вызвано действием посторонней причины.

При равномерном движении пройденный путь пропорционален времени. Но время, затрачиваемое на прохождение определенного пути, может быть больше или меньше в зависимости от движущей силы. Это различие породило идею скорости, которая при равномерном движении определяется отношением пройденного пути к затраченному на его прохождение времени. Чтобы не сравнивать между собой разнородные величины, такие как пространство и время, берут интервал времени, например секунду, за единицу времени. Подобным же образом выбирают единицу длины, такую как метр, и тогда пространство и время представляются отвлеченными числами, выражающими, сколько они заключают единиц своего рода, и их можно сравнивать между собой. Таким образом, скорость определяется отношением двух отвлеченных чисел, и ее единица есть скорость тела, пробегающего один метр в секунду. Приводя таким образом расстояние, время и скорость к отвлеченным числам, мы видим, что расстояние равно произведению скорости на время, которое в свою очередь равно расстоянию, деленному на скорость.

Так как сила определяется только через путь, который она заставляет тело пройти в определенное время, естественно взять этот путь для ее измерения. Но это предполагает, что несколько сил, одновременно и в одном направлении действующих на тело, заставят его пройти за единицу времени расстояние, равное сумме расстояний, которые заставили бы пройти каждая из них по отдельности, или, иначе говоря, сила пропорциональна скорости. *A priori* мы этого знать не можем, так как природа движущей силы нам неизвестна. Поэтому в этом вопросе мы снова должны обратиться к опыту, так как все, что не является необходимым следствием из того немногого, что мы знаем о природе вещей, есть для нас лишь результат наблюдения.

Сила может быть выражена бесконечным числом функций скорости, не вносящих противоречий. Так, например, можно предположить, что она пропорциональна квадрату скорости. При таком предположении легко определить движение точки, увлекаемой любым числом сил, скорости которых известны. Так, если отложить на направлениях этих сил от начальной точки отрезки, выражающие скорости, которые они сообщили бы по отдельности каждой материальной точке, и исходя из этой же точки отложить в тех же направлениях другие отрезки, относящиеся между собой как квадраты первых, то эти отрезки могли бы представить эти самые силы. Далее, складывая их, как было указано, получим как направление результирующей силы, так и выражающий ее отрезок. Из сказанного видно, как можно определить движение точки, какова бы ни была функция скорости, выражающая силу. Среди всевозможных математических функций исследуем ту, которая присуща природе.

На Земле мы наблюдаем, что тело, побуждаемое какой-нибудь силой, движется одинаковым образом, каков бы ни был угол, составленный направлением этой силы с направлением движения, общим для этого тела и для той части земной поверхности, где оно находится. Небольшое

отклонение от этого правила очень заметно изменило бы продолжительность колебания маятника в зависимости от положения плоскости его колебаний. А опыт показывает, что во всех вертикальных плоскостях эта продолжительность в точности одинакова. На корабле, движение которого равномерно, подвижное тело под воздействием пружины, силы тяжести или любой другой силы движется относительно частей корабля одинаково, каковы бы ни были скорость корабля и направление его движения. Следовательно, можно установить как общий закон земных движений, что, если в системе тел, увлекаемых общим движением, к одному из них приложить некоторую силу, его относительное или видимое движение будет одним и тем же, каковы бы ни были общее движение системы и угол, составленный его направлением с направлением приложенной силы.

Из этого закона, предполагаемого строгим, вытекает, что сила пропорциональна скорости. Так, если представить себе два тела, с одинаковой скоростью движущихся по одной прямой, и к одному из них приложить силу, прибавляющуюся к первой, его скорость относительно другого тела будет такой же, как если бы первоначально оба тела были неподвижны. Ясно, что путь, пройденный телом под воздействием начальной силы и той, что к ней прибавлена, равен сумме путей, которые каждая из сил заставила бы тело пройти за это же время. А это предполагает, что сила пропорциональна скорости.

И наоборот: если сила пропорциональна скорости, относительные движения тел, движущихся под воздействием любых сил, останутся прежними, каково бы ни было их общее движение, потому что это движение, разложенное на три составляющие, параллельные трем неподвижным осям, заставляет увеличиваться на одну и ту же величину парциальные скорости каждого тела параллельно этим осям. А так как относительная скорость зависит только от разности парциальных скоростей, она будет той же, каково бы ни было общее движение всех тел. Поэтому, участвуя в движении системы тел, по наблюдаемым в ней явлениям невозможно судить о ее абсолютном движении. Вот что характеризует этот закон, неведение которого задержало познание истинной системы мира из-за того, что трудно было разобраться в относительных движениях тел, перемещающихся над Землей, увлекаемой двойным движением: вращением вокруг самой себя и обращением вокруг Солнца.

Ввиду исключительной малости самых значительных движений, которые мы можем сообщить телам, по сравнению с движением, увлекающим их вместе с Землей, для того чтобы видимые движения системы тел были независимы от направления этого движения, достаточно, чтобы небольшое увеличение силы, приводящей в движение Землю, относилось к соответствующему увеличению скорости, как сами эти величины. Так, наш опыт только доказывает реальность этой пропорции, которая, если она имеет место независимо от скорости Земли, дала бы закон пропорциональности скорости и силы. Более того, она дала бы этот закон, если бы функция скорости, выражающая силу, состояла бы лишь из одного члена. Если бы скорость не была пропорциональна силе, пришлось

бы предположить, что в природе функция скорости, выражающая силу, образована из нескольких членов, что мало вероятно. Кроме того, надо было бы предположить, что скорость Земли в точности такова, чтобы удовлетворить упомянутому выше отношению, что мало правдоподобно. К тому же скорость Земли изменяется в разные времена года: она приблизительно на 1/30 больше зимой, чем летом. Это изменение делается еще значительнее, если, как все на это указывает, солнечная система движется в пространстве. Поэтому в зависимости от того, совпадает ли это поступательное движение с движением Земли или обратно ему, в абсолютном движении Земли должны получаться большие годичные неравномерности. А это должно было бы изменить пропорцию, о которой идет речь, и отношение приложенной силы к относительной скорости, которую она сообщает, если бы эти пропорция и отношение не были независимы от абсолютной скорости.

Все небесные явления подтверждают эти доводы. Скорость света, определенная по затмениям спутников Юпитера, складывается со скоростью Земли в точности по такому же закону, как закон пропорциональности силы и скорости, и все движения солнечной системы, вычисленные по этому закону, в точности совпадают с наблюдениями.

Итак, вот два закона движения, а именно, закон инерции и закон пропорциональности силы и скорости, которые получены благодаря наблюдениям. Они наиболее естественные и самые простые из всех, какие можно вообразить, и, несомненно, вытекают из самой природы материи. Но так как эта природа нам неизвестна, для нас эти законы — лишь только наблюденные факты, впрочем, единственные, которые механика заимствует из опыта.

Поскольку скорость пропорциональна силе, эти две величины могут быть выражены одна через другую. Поэтому на основании предыдущего можно получить скорость точки, увлекаемой любым числом сил, у которых известны направления и скорости.

Если точка подвергается действию постоянных сил, в своем непрерывно меняющемся движении она опишет кривую, вид которой зависит от действующих на нее сил. Чтобы его определить, надо рассмотреть элементы этой кривой, выяснить, как они рождаются одни из других и, исходя из закона изменения координат, установить их окончательные выражения. Это является задачей исчисления бесконечно малых, счастливое открытие которого доставило механике так много возможностей. Понятно, насколько полезно совершенствовать этот мощный инструмент человеческого разума.

Сила тяжести являет нам повседневный пример силы, действующей, по-видимому, беспрерывно. Правда, мы не знаем, не разделено ли ее действие неощутимо малыми промежутками времени, но поскольку при этой гипотезе явления были бы почти такими же, как и в случае совершенно непрерывного действия, геометры предпочли последнюю гипотезу как более удобную и простую. Изложим законы этих явлений.

Сила тяжести представляется действующей одинаково как на неподвижные, так и на движущиеся тела. В первое мгновение тело, предо-

ставленное ее действию, приобретает бесконечно малую ступень скорости, во второе мгновение к ней прибавляется еще одна ступень скорости и так далее. Таким образом, скорость возрастает вместе со временем.

Если вообразить прямоугольный треугольник, одна сторона которого представляет время и увеличивается вместе с ним, другая сторона могла бы представлять скорость. Элемент поверхности этого треугольника, равный произведению элемента времени на скорость, будет представлять элемент расстояния, пройденного под действием силы тяжести. Это расстояние будет представлено всей площадью треугольника, которая, увеличиваясь как квадрат одной из его сторон, показывает, что в движении, ускоренном силой тяжести, скорости возрастают как время, и высоты, с которых тела падают из положения покоя, увеличиваются как квадраты времени или скорости. Поэтому если за единицу принять расстояние, на которое тело упадет за первую секунду, оно опустится на четыре единицы за 2 с, на девять единиц через 3 с и т. д. Таким образом, за каждую секунду тело пролетит расстояние, возрастающее как нечетные числа 1, 3, 5, 7... и т. д.

Расстояние, которое тело прошло бы при постоянной скорости, приобретенной им к концу падения, за время, затраченное на это падение, будет равно произведению этого времени на скорость. Это произведение равно удвоенной поверхности треугольника. Итак, тело, двигающееся равномерно под влиянием приобретенной им скорости, за время, равное времени его падения, описала бы расстояние, вдвое большее, чем то, которое оно прошло при падении.

Отношение приобретенной скорости к времени постоянно для данной ускоряющей силы. Оно увеличивается или уменьшается в зависимости от величины этой силы и, следовательно, может служить для ее выражения. Так как удвоенное пройденное расстояние равно произведению времени на скорость, ускоряющая сила равна этому удвоенному расстоянию, разделенному на квадрат времени. Она также равна квадрату скорости, разделенному на удвоенный путь. Эти три способа выражения ускоряющей силы полезны при разных обстоятельствах. Они не дают абсолютных значений этих сил, а выражают лишь их взаимные отношения, что только и нужно для механики.

На наклонной плоскости действие силы тяжести разлагается на две составляющие: одна, перпендикулярная плоскости, уничтожается ее сопротивлением, другая, параллельная плоскости, относится к исходному значению силы тяжести как превышение одного конца плоскости над другим к ее длине. Следовательно, на наклонных плоскостях движение будет равномерно ускоренным, но скорости и пройденные расстояния будут находиться к скоростям и расстояниям, пройденным за то же время по вертикали, в том же отношении. Отсюда следует, что все хорды вертикальной окружности, сходящиеся к одному из концов ее вертикального диаметра, под влиянием силы тяжести описываются за то же время, что и этот диаметр.

Тело, брошенное в направлении любой прямой, непрерывно от нее отклоняется, описывая вогнутую к горизонту кривую, к которой эта прямая

является первой касательной. Движение тела, перенесенное на эту касательную вертикальными линиями, равномерно, но оно ускоряется по вертикали в соответствии с приведенным нами законом. Таким образом, вертикали, построенные в каждой точке кривой и продолженные до пересечения с первой касательной, будут пропорциональны квадратам соответствующих отрезков этой касательной, что свойственно параболе. Если сила метания направлена вверх по вертикали, парабола совпадает с ней. Поэтому формулы параболического движения охватывают и ускоренные или замедленные движения по вертикали.

Таковы законы падения тяжелых тел, открытые Галилеем. Сегодня нам кажется, что их легко было открыть. Но поскольку они ускользнули от исследований философов, несмотря на явления, воспроизводившие их непрерывно, оказался необходимым редкий гений, чтобы распознать их в этих явлениях.

В первой книге мы уже видели, что материальная точка, подвешенная на одном конце невесомой прямой, противоположный конец которой закреплен неподвижно, образует простой маятник. Если этот маятник отклонить от вертикали, он стремится возвратиться к ней, и это стремление почти пропорционально отклонению, если отклонение незначительно. Представим себе два маятника одинаковой длины, одновременно отклоняющихся с очень малыми скоростями от вертикального положения. В первый момент они опишут дуги, пропорциональные этим скоростям. В начале второго момента, равного первому, скорости будут замедлены пропорционально описанным дугам и, следовательно, начальным скоростям. Значит, дуги, описанные за второй момент, также пропорциональны этим скоростям. То же произойдет в третий момент, в четвертый и т. д. Таким образом, в каждый момент скорости и дуги, отсчитанные от вертикального положения, будут пропорциональны исходным скоростям, и маятники одновременно придут к состоянию покоя. Затем они вернутся к вертикали ускоренным движением по тем же законам, по которым их скорость замедлялась, и одновременно достигнут ее с исходной скоростью. После этого они таким же образом качнутся по другую сторону от вертикали, и, не испытывая сопротивления, качались бы так бесконечно долго. Ясно, что размах их колебаний пропорционален начальной скорости, но время колебаний одно и то же и, следовательно, не зависит от размаха колебаний. Так как сила, ускоряющая или замедляющая маятник, не вполне точно соответствует дуге отклонения от вертикали, при малых колебаниях тяжелого тела, движущегося по дуге круга, эта изохронность является лишь приблизительной. Изохронность соблюдается в точности при движении маятника по кривой, на которой сила тяжести, разложенная параллельно касательной, пропорциональна дуге, отсчитанной от самой нижней точки, что немедленно дает ее дифференциальное уравнение. Гюйгенс, которому мы обязаны приложением маятника к часам, старался найти эту кривую и способ заставить маятник ее описывать. Он нашел, что это — циклоида, расположенная вертикально так, что ее вершина является самой низкой точкой. Чтобы заставить тело, подвешенное на конце нерастяжимой нити, описывать эту циклоиду, достаточно

другой конец этой нити укрепить в общем начале двух других таких же циклоид, расположенных тоже вертикально, но в противоположном направлении, причем нить во время качания должна охватывать поочередно каждую из этих кривых. Как бы ни были остроумны эти исследования, опыт заставил предпочесть круговой маятник, как более простой и достаточно точный, даже для астрономии.[25] Но теория разверток, или эволют, порожденная ими, оказалась очень важной по своим применениям к системе мира.

Период очень малых колебаний кругового маятника относится к времени, за которое тяжелое тело падает с высоты, равной двойной длине этого маятника, как полуокружность относится к диаметру. Таким образом, время падения вдоль малой дуги, ограниченной вертикальным диаметром, относится к времени падения вдоль этого диаметра, или, что то же самое, к хорде этой дуги, как четверть окружности относится к диаметру. Следовательно, прямая, проведенная между двумя заданными точками, не является линией самого быстрого спуска от одной из них к другой. Поиски такой линии заинтересовали геометров, и они нашли, что это циклоида, начало которой расположено в самой высокой точке.

Длина простого маятника, отбивающего секунды, относится к удвоенной высоте, с которой падают тела под действием силы тяжести в первую секунду их падения, как квадрат диаметра относится к квадрату окружности. Так как эту длину можно измерить с большой точностью, посредством этой теоремы можно получить время падения тел с определенной высоты значительно точнее, чем путем прямых опытов.[26] В первой книге указывалось, что очень точные опыты дали длину секундного маятника [27] в Париже, равную 0.741877 м. Отсюда следует, что сила тяжести заставляет тело за первую секунду падать на 3.66107 м. Этот переход от колебательного движения, период которого можно с большой точностью определять, к прямолинейному движению тяжелых тел является остроумнейшим наблюдением, которым мы обязаны Гюйгенсу.

Продолжительности очень малых колебаний маятников разной длины, движимых одной и той же силой тяжести, относятся как корни квадратные из их длины. Если же маятники одинаковой длины, а силы тяжести различны, продолжительности колебаний обратны квадратным корням из сил тяжести.

На основании этих теорем было определено изменение силы тяжести на поверхности Земли и на вершинах гор. Наблюдения маятников позволили также узнать, что сила тяжести не зависит ни от поверхности, ни от формы тел, но что она проникает в самые глубокие их части и стремится сообщить им одновременно одинаковые скорости. Чтобы в этом убедиться, Ньютон заставлял колебаться большое число тел одинакового веса, но разной формы и из разных материалов, помещая их в одну и ту же емкость, чтобы сопротивление воздуха было одинаковым. Несмотря на всю точность, с которой производились им эксперименты, он не заметил ощутимой разницы в длине простых секундных маятников, выведенной из продолжительности колебания этих тел. Отсюда следует, что при от-

сутствии сопротивления качанию их скорости, достигнутые под влиянием силы тяжести за одинаковое время, равны между собой.

В круговом движении мы имеем еще один пример непрерывно действующей силы. Так как движение материи, предоставленной самой себе, равномерно и прямолинейно, ясно, что тело, движущееся по окружности, непрерывно стремится удалиться от центра по касательной. Усилие, которое оно для этого делает, называется *центробежной силой,* а *центральной,* или *центростремительной,* силой называют всякую силу, направленную к центру. В круговом движении центростремительная сила равна и прямо противоположна центробежной. Она непрерывно стремится приблизить тело с окружности к центру, и за очень короткий промежуток времени ее действие измеряется синусом-верзусом малой описанной дуги.

Учитывая сказанное, можно сравнить силу тяжести с центробежной силой, вызванной вращением Земли. На экваторе тела вследствие этого вращения за каждую секунду времени описывают дугу $40.^{cc}1095$ [$12.''9955$] экваториальной окружности Земли. Так как радиус экватора равен почти в точности 6 376 606 м, синус-верзус дуги равен 0.0126559 м. За 1 с сила тяжести на экваторе заставляет тела падать на 3.64930 м; центростремительная сила, необходимая, чтобы удержать тела на поверхности Земли, и, тем самым, центробежная сила, обусловленная ее вращением, относится к силе тяжести на экваторе как единица к 288.4. Центробежная сила уменьшает силу тяжести, и на экваторе тела падают под действием только разности этих двух сил. Поэтому, называя *гравитацией* полное притяжение, или силу тяжести, не уменьшенную центробежной силой, получим, что на экваторе центробежная сила с большим приближением равна 1/289 гравитации. Если бы Земля вращалась в 17 раз быстрее, дуга, описанная за 1 с, была бы в 17 раз больше, ее синус-верзус был бы в 289 раз больше, центробежная сила была бы в этом случае равна гравитации и тела на земном экваторе потеряли бы вес.

Вообще, ускоряющая постоянная сила, действующая всегда в одном направлении, равна удвоенному пути, который она заставляет описать тело, разделенному на квадрат времени. Всякая ускоряющая сила в очень коротком интервале времени может считаться постоянной и действующей в одном направлении. Путь, который центростремительная сила заставляет тело описывать при круговом движении, равен синусу-верзусу описанной малой дуги, и этот последний почти точно равен квадрату дуги, разделенному на диаметр. Поэтому выражение этой силы представляется квадратом описанной дуги, деленным на квадрат времени и на радиус окружности. Дуга, разделенная на время, равна скорости тела, и, следовательно, как центростремительная, так и центробежная сила равны квадрату скорости, разделенному на радиус.

Сопоставив этот вывод с тем, к которому мы пришли раньше и в соответствии с которым сила тяжести равна квадрату достигнутой скорости, разделенной на удвоенное расстояние, пройденное по вертикали, мы увидим, что центробежная сила равна силе тяжести, если скорость вращающегося тела равна скорости, приобретаемой весомым телом, падающим с высоты, равной половине радиуса описываемой окружности.

Скорости нескольких тел, двигающихся по окружностям, равны периметрам этих окружностей, деленным на время обращения. Окружности относятся друг к другу как их радиусы. Следовательно, квадраты скоростей относятся как квадраты радиусов, деленные на квадраты времен обращения. Поэтому центробежные силы относятся между собой как радиусы окружностей, деленные на квадраты времен обращения. Отсюда следует, что на разных параллелях Земли центробежные силы, вызванные ее вращательным движением, пропорциональны радиусам этих параллелей.

Эти прекрасные теоремы, выведенные Гюйгенсом, привели Ньютона к общей теории движения по кривым и к закону всемирного тяготения.

Тело, описывающее некоторую кривую, стремится отклониться от нее по касательной; всегда можно вообразить окружность, проходящую через два смежных элемента[28] этой кривой и называемую *оскулирующей окружностью*. В два последовательных отрезка времени тело движется по этой окружности. Следовательно, его центробежная сила равна квадрату скорости, разделенному на радиус этой оскулирующей окружности, но ее положение и радиус непрерывно изменяются.

Если кривая описана под действием силы, направленной к неподвижной точке, ее можно разложить на две, из которых одна направлена по оскулирующему радиусу, а другая — по элементу кривой. Первая из них уравновешивает центробежную силу, вторая — увеличивает или уменьшает скорость тела, и поэтому его скорость непрерывно изменяется. Но она всегда такова, что *площади, описанные радиусом-вектором вокруг центра действия силы, пропорциональны времени. И наоборот, если площади, описанные радиусом-вектором вокруг неподвижной точки, возрастают как время, сила, заставляющая их описывать, направлена постоянно к этой точке*. Эти зависимости, фундаментальные для теории системы мира, легко доказываются следующим образом.

Можно предположить, что ускоряющая сила действует только в начале каждого отрезка времени, в течение которого движение тела равномерно. Тогда радиус-вектор опишет маленький треугольник. Если бы сила перестала действовать в следующий отрезок времени, радиус-вектор описал бы в этот второй отрезок времени новый треугольник, равный первому, поскольку вершины этих треугольников находятся в неподвижной точке — центре действия силы, а их основания, расположенные на одной прямой, равны, как описанные с одинаковыми скоростями в равные промежутки времени. Но в начале нового отрезка времени ускоряющая сила сочетается с касательной силой, действующей на тело, и заставляет его описать диагональ параллелограмма, стороны которого представляют эти силы. Треугольник, описываемый радиусом-вектором под действием этой комбинированной силы, равен тому, который был бы описан в отсутствие ускоряющей силы, так как эти два треугольника имеют общим основанием радиус-вектор конца первого отрезка времени, а их вершины находятся на прямой, параллельной этому основанию. Поэтому площади, описанные радиусом-вектором, равны в обоих последовательных и равных отрезках времени. Следовательно, сектор, описанный этим радиусом, воз-

растает как число таких отрезков времени или как время. Ясно, что это будет только при условии, если ускоряющая сила направлена к неподвижной точке. В противном случае рассматриваемые нами треугольники не были бы одинаковой высоты. Таким образом, пропорциональность площадей времени доказывает, что ускоряющая сила постоянно направлена к началу радиуса-вектора.

В этом случае, если вообразить очень малый сектор, описанный за очень короткое время, из начала дуги этого сектора провести касательную к кривой и продолжить до этой касательной радиус, проведенный из центра действия силы к другому концу дуги сектора, то часть радиуса, заключенная между дугой и касательной, будет, очевидно, расстоянием, пройденным под влиянием центростремительной силы. Удвоив это расстояние и разделив результат на квадрат времени, получим выражение силы. А так как сектор пропорционален времени, центростремительная сила будет как бы частью радиуса, заключенной между кривой и касательной, разделенной на квадрат сектора. Строго говоря, центростремительная сила в разных точках кривой не пропорциональна этой дроби, но она приближается к ней по мере уменьшения секторов так, что в пределе равна ей в точности. Дифференциальный анализ дает этот предел в виде функции радиуса, когда форма кривой известна, и тогда получают функцию расстояния, которому пропорциональна центростремительная сила.

Хотя закон действия силы известен, определение кривой, которую она заставляет описывать, все же представляет большие трудности. Но каковы бы ни были силы, приводящие в движение тело, предполагаемое свободным, легко следующим образом написать дифференциальные уравнения его движения. Вообразим три неподвижные и взаимно перпендикулярные оси, относительно которых для некоторого момента определены три координаты рассматриваемого тела. Разлагая каждую из действующих на него сил на три других, параллельных этим же осям, и умножив равнодействующую всех сил, параллельных одной из координатных осей, на элемент времени ее действия, получим приращение скорости тела, параллельное этой координате. Эта скорость может быть приравнена к элементу координаты, разделенному на элемент времени, так что дифференциал частного от этого деления равен предыдущему произведению. Рассмотрение двух других координат дает еще два подобных равенства. Таким образом, определение движения тела становится задачей чистого анализа, который сводится к интегрированию этих дифференциальных уравнений.

Вообще, если положить, что элемент времени постоянен, вторая разность каждой координаты, разделенная на квадрат этого элемента, представит силу, которая, будучи приложена к точке в обратном направлении, уравновесила бы силу, действующую по этой координате. Если умножить разность этих сил на произвольное изменение координаты и сложить три подобных произведения, относящихся к трем координатам, то, по условию равновесия, их сумма будет равна нулю. Если тело свободно, изменения всех трех координат будут произвольными, и, приравняв коэффициенты при каждой из них нулю, получим три дифференциальных уравнения

движения точки. Но если точка не свободна, между тремя координатами возникают одна или две зависимости, которые дадут такое же число уравнений, связывающих произвольные изменения координат. Поэтому, исключив с их помощью столько же этих изменений, мы приравняем нулю коэффициенты остающихся изменений и получим дифференциальные уравнения движения, которые в сочетании с соотношениями координат определят положение точки для любого момента.

Интегрирование этих уравнений нетрудно, если сила направлена к неподвижному центру. Но часто природа сил делает это интегрирование невозможным. Однако рассмотрение дифференциальных уравнений приводит к некоторым интересным принципам механики. Например, дифференциал квадрата скорости точки, подвергнутой действию ускоряющих сил, равен удвоенной сумме произведений каждой силы на малый отрезок, на который точка подвигается в направлении этой силы. Отсюда легко заключить, что скорость, достигнутая весомым телом вдоль некоторой кривой или изогнутой поверхности, такова, как если бы оно вертикально падало с той же высоты.

Многие философы, пораженные порядком, господствующим в природе, и ее плодовитостью в создании явлений, пришли к мысли, что она всегда приходит к своей цели самым простым путем. Распространяя этот взгляд на механику, они искали в ней экономию, которую соблюдает природа в использовании сил и времени. Птолемей узнал, что отраженный свет проходит из одной точки в другую по самому короткому пути и, следовательно, в самое короткое время, полагая скорость световых лучей неизменной. Ферма, один из самых великолепных гениев, которыми гордится Франция, обобщил этот принцип, распространив его на преломление света. Он предположил, что свет проходит из точки, взятой вне прозрачной среды, в точку, находящуюся внутри ее, за самое короткое время. Затем, считая очень вероятным, что скорость света должна быть меньше в этой среде, чем в пустоте, он искал, каков будет при этом предположении закон преломления света. Приложив к этой проблеме свой прекрасный метод максимумов и минимумов, который надо рассматривать как истинный зародыш дифференциального исчисления, он нашел в согласии с опытом, что синусы углов падения и преломления должны быть в постоянном отношении, большем единицы. Счастливый способ, которым Ньютон вывел это отношение из притяжения сред, навел Мопертюи на мысль, что скорость света в прозрачных средах увеличивается и что, таким образом, вопреки утверждениям Ферма, не сумма частных от деления расстояний, пройденных в пустоте и в среде, на соответствующие скорости, а сумма произведений этих величин должна быть минимальна. Эйлер распространил это предположение на непрерывно изменяющиеся движения и доказал разными примерами, что *среди всех кривых, какие может описать тело, двигаясь из одной точки в другую, оно всегда выбирает ту, в которой интеграл произведения его массы на скорость и на элемент кривой минимален.* Таким образом, скорость точки, движущейся по кривой поверхности и не побуждаемой никакой силой, постоянна; точка переходит из одного положения в другое по самой ко-

роткой линии на этой поверхности. Вышеупомянутый интеграл назвали *действием тела*, а совокупность подобных интегралов, относящихся к каждому телу некоторой системы, *действием системы*. Эйлер установил, что это действие всегда минимально, так что экономия природы сводится к его сбережению. В этом заключается *принцип наименьшего действия*, настоящим изобретателем которого надо считать Эйлера, и который затем был выведен Лагранжем из основных законов движения. Этот принцип по существу есть лишь весьма любопытный результат этих законов, которые, как мы уже видели, наиболее естественны и самые простые из всех, какие можно вообразить, и которые поэтому кажутся вытекающими из самого существа материи. Он годится для всех математически возможных зависимостей между силой и скоростью, если в эти зависимости вместо скорости подставлять функцию скорости, через которую выражена сила. Поэтому принцип наименьшего действия не следует рассматривать как конечную причину. Этот принцип не только не породил законы движения, но даже не способствовал их открытию, без которого все еще спорили бы о том, что следует понимать под принципом наименьшего действия в природе.

## Глава III

### О РАВНОВЕСИИ СИСТЕМЫ ТЕЛ

Самый простой случай равновесия нескольких тел — это равновесие двух материальных точек, сталкивающихся с равными, но противоположными скоростями. Их взаимная непроницаемость — свойство материи, в силу которого два тела не могут в одно и то же время занимать одно и то же место, уничтожает, очевидно, их скорости и приводит эти тела в состояние покоя. Но каково будет в случае равновесия отношение скоростей к массам, если сталкиваются два тела с разными массами и с взаимно противоположными скоростями? Чтобы разрешить эту проблему, вообразим систему соприкасающихся материальных тел, расположенных на одной прямой и двигающихся с некоторой общей скоростью в одном направлении. Кроме того, представим себе другую систему соприкасающихся материальных тел, расположенных на той же прямой и перемещающихся тоже с общей скоростью в противоположном направлении. Столкнувшись, обе системы приходят в равновесие. Ясно, что если бы первая система состояла только из одной материальной точки, каждая точка второй системы погашала бы при столкновении часть скорости первой системы, равную скорости второй системы. Следовательно, в рассматриваемом случае равновесия, скорость ударяющей точки должна быть равной произведению скорости второй системы на число ее точек. В результате первую систему можно заменить одной точкой, придав ей скорость, равную этому произведению. Подобным же образом вторую систему можно заменить материальной точкой со скоростью, равной скорости первой системы, умноженной на число ее точек. Так, вместо двух

систем, мы получим две точки, которые уравновесятся противоположными скоростями, из которых одна будет произведением скорости первой системы на число ее точек, а вторая — произведением скорости второй системы на число ее точек. В случае равновесия эти произведения должны быть одинаковы.

Масса тела равна сумме его материальных точек. Произведение массы на скорость называют *количеством движения*, или еще *силой тела*. Для равновесия двух тел или двух систем материальных точек, сталкивающихся в противоположных направлениях, количества движения, или противоположные силы тела, должны быть равны и, следовательно, их скорости должны быть в обратном отношении к массам.

Очевидно, что две материальные точки могут действовать друг на друга только по соединяющей их прямой. Действие первой из них, направленное на вторую, сообщает ей некоторое количество движения. Можно представить себе, что вторая точка еще раньше, чем на нее подействовала первая, находилась под воздействием этого количества и еще другого количества движения, равного ему, но противоположно направленного. Тогда действие первого тела сведется к уничтожению этого последнего количества движения. Но для этого оно должно затратить равное и противоположное количество движения, которое будет уничтожено. Вообще, мы видим, что при взаимодействии тел противодействие всегда равно и противоположно действию. Мы видим еще, что это равенство вовсе не предполагает наличия в материи какой-то особой силы. Оно вытекает из того, что одно тело не может приобрести движение, не отняв его у другого, подобно тому, как один сосуд наполняется по мере расхода жидкости в другом, соединенном с ним сосуде.

Равенство действия противодействию проявляется во всех явлениях природы. Железо притягивает магнит точно так же, как магнит притягивает железо. То же самое наблюдается в электрическом притяжении и отталкивании и даже в действии сил, присущих живым существам; так как, каков бы ни был двигательный принцип человека и животных, через реакцию материи они всегда испытывают действие силы, равной и противоположной той силе, которую они этой материи сообщают; и в этом смысле они подвержены действию тех же законов, что и неживые тела.

Обратная пропорциональность скоростей массам в случае равновесия служит для определения отношения масс различных тел. У однородных тел массы пропорциональны их объемам, измерению которых учит геометрия. Но все тела, как мы знаем, не имеют одинаковых свойств, и существующее между ними несходство либо в составляющих их молекулах, либо в числе и величине пор, или промежутков, которые разделяют эти молекулы, приводит к очень большим различиям в массах этих тел, заключенных в одинаковых объемах. В таких случаях геометрии оказывается недостаточно, чтобы определить отношения их масс, и становится необходимым прибегнуть к механике.

Если представить себе два шара из разных материалов и менять их диаметры до тех пор, пока движимые с равными и противоположными скоростями они не придут в состояние равновесия, можно быть уверен-

ным, что тогда они будут включать одинаковое число материальных точек и, следовательно, будут иметь одинаковые массы. Таким образом, получаем отношение объемов этих веществ к равным массам. Затем с помощью геометрии получаем отношение масс двух любых объемов одинакового вещества. Но применение этого метода было бы очень трудным при многочисленных сравнениях, которые постоянно требуются для нужд коммерции. К счастью, природа предлагает нам — через свойство тяжести предметов — очень простой способ сравнивать их массы.

В предыдущей главе мы отмечали, что каждая материальная точка в одном и том же пункте на Земле под действием силы тяжести стремится двигаться с одинаковой скоростью. Сумма этих стремлений и представляет вес тела. Таким образом, вес пропорционален массе. Отсюда следует, что если два тела, подвешенные на концах нити, перекинутой через блок, оказываются уравновешенными, когда части нити по обе стороны блока равны по длине, массы этих тел равны. Стремясь под влиянием силы тяжести двигаться с одинаковой скоростью, они действуют одно на другое, как если бы они столкнулись с равными и противоположными скоростями. Два тела можно привести в равновесие еще с помощью весов, у которых плечи коромысла и чашки строго равны между собой, что позволит быть уверенным в равенстве их масс. Таким образом, отношение масс различных тел можно получить с помощью точных и чувствительных весов и большого числа одинаковых гирек, определяя их число, необходимое для уравновешивания этих масс.

Плотность тела зависит от числа его материальных точек, заключенных в данном объеме. Она пропорциональна отношению массы к объему. Вещество, не имеющее пор, имело бы самую большую плотность из всех возможных. Сравнивая с ним плотность других тел, можно было бы получить количество заключенной в них материи. Но так как подобного вещества мы не знаем, то можем получить только относительные плотности тел. Эти плотности относятся между собой как веса соответствующих тел, взятых в одинаковом объеме, так как веса пропорциональны массам. Поэтому, взяв за единицу плотность какого-либо вещества при постоянной температуре, например *максимум* плотности дистиллированной воды, получим плотность тела, равную отношению его веса к весу такого же объема воды, приведенного к этому максимуму. Это отношение называется *удельным весом.*

Во всем сказанном, как будто, предполагалось, что материя однородна и тела различаются только формой и величиной их пор и составляющих эти тела молекул. Между тем возможно, что есть существенные различия в свойствах самих молекул, и тому немногому, что мы знаем о материи, не противоречит предположение, что небесное пространство заполнено флюидом, лишенным пор, но в то же время таким, что он оказывает лишь неощутимое сопротивление движению планет. Это позволило бы примирить неизменность этих движений, доказанную наблюдаемыми явлениями, с мнением тех, кто не считает возможным существование пустоты. Но это безразлично для механики, изучающей только протяженность тел и их движение. Поэтому можно, не боясь впасть в ошибку,

принять однородность элементов материи при условии, что под одинаковыми массами подразумеваются массы, которые, будучи подвергнуты действию равных, но противоположных сил, приходят в равновесие.

В теории равновесия и движения тел отвлекаются от числа и формы пор, которыми они пронизаны. Можно объяснить различие их относительных плотностей, предположив, что тела образованы из более или менее плотных материальных точек, совершенно свободных в жидкости и газе, соединенных между собой лишенными массы несгибаемыми прямыми в твердых телах и гибкими и растяжимыми — в телах эластических и мягких. Ясно, что при этих предположениях тела казались бы такими, какими мы их воспринимаем.

Условия равновесия системы тел могут всегда быть определены по закону сложения сил, изложенному в первой главе этой книги; ибо можно представить силу, действующую на каждую материальную точку, приложенной к месту встречи направления ее действия с направлениями других сил, которые ее уничтожат или, сложившись с нею, образуют равнодействующую силу, которая в случае равновесия погасится неподвижными точками системы. Рассмотрим, например, две материальные точки, расположенные на концах несгибаемого рычага, и предположим, что на них воздействуют силы, направленные в плоскости, проходящей через этот рычаг. Если принять, что эти силы сосредоточены в точке встречи их направлений, равнодействующая сила для равновесия должна проходить через точку опоры — единственную точку, которая может ее уничтожить. По закону сложения сил, две составляющие должны быть противоположны перпендикулярам, проведенным из точки опоры на их направления.

Если вообразить два тяжелых тела, расположенных на концах несгибаемого рычага, массу которого можно считать бесконечно малой по сравнению с массой этих тел, можно положить, что направления, параллельные силе тяжести, соединяются в бесконечности. В этом случае силы, действующие на каждое из этих двух тел, или, что то же, их веса, для равновесия должны быть противоположны направлениям перпендикуляров, проведенных из точки опоры на направления этих сил. Эти перпендикуляры пропорциональны плечам рычага. Таким образом, веса двух уравновешенных тел обратно пропорциональны плечам рычага, с которыми они связаны.

Поэтому очень небольшой вес с помощью рычага и подобных ему приспособлений может уравновесить очень значительный вес, и таким способом можно поднять огромный груз, приложив лишь небольшое усилие. Но для этого надо, чтобы плечо рычага, к которому прилагается сила, было гораздо длиннее плеча, поднимающего тяжесть, и чтобы подъемная сила перемещалась на большем расстоянии, поднимая груз на малую высоту. При этом потеря во времени возмещается выигрышем в силе, что обычно имеет место в машинах. А часто бывает, что, располагая неограниченным временем, можно использовать лишь ограниченную силу. При других обстоятельствах, например если надо развить большую скорость, можно также использовать рычаг, прилагая силу к его более

короткому плечу. Именно в возможности по мере надобности увеличивать массу или скорость подлежащих перемещению тел и состоит главное преимущество машин.

Рассмотрение рычага породило идею моментов. *Моментом силы,* заставляющей систему вращаться вокруг точки, называют произведение этой силы на расстояние от точки до направления действующей силы. Таким образом, в случае равновесия рычага, к концам которого приложены две силы, моменты этих сил по отношению к точке опоры должны быть равны и противоположны, или, что сводится к тому же, сумма моментов относительно этой точки должна быть равна нулю.

Проекция силы на проходящую через неподвижную точку плоскость, умноженная на расстояние точки от этой проекции, называется моментом силы, вращающей систему вокруг оси, проходящей через неподвижную точку перпендикулярно этой плоскости.

Момент равнодействующей любого числа сил по отношению к точке или какой-либо оси равен сумме таких же моментов составляющих сил.

Так как можно предположить, что параллельные силы соединяются в бесконечности, их можно свести к равнодействующей силе, равной их сумме и параллельной им. Поэтому, разлагая каждую силу, действующую на систему тел, на две — одну, лежащую в плоскости, и другую, перпендикулярную к этой плоскости, — можно все силы, лежащие в этой плоскости, свести к одной равнодействующей, так же как и перпендикулярные ей силы — к другой равнодействующей. Всегда существует плоскость, проходящая через неподвижную точку, и притом такая, что равнодействующая сил, перпендикулярных этой плоскости, равна нулю или проходит через эту точку. В обоих этих случаях момент равнодействующей равен нулю по отношению к осям, начало которых лежит в этой точке, и момент сил системы относительно этих осей сводится к моменту равнодействующей, расположенной в плоскости, о которой идет речь. Ось, относительно которой этот момент максимален, перпендикулярна этой плоскости, и момент сил системы относительно оси, проходящей через неподвижную точку и составляющей некоторый угол с осью наибольшего момента, равен наибольшему моменту системы, умноженному на косинус этого угла, так что этот момент равен нулю для всех осей, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси наибольшего момента.

Сумма квадратов косинусов углов, образованных осью наибольшего момента с тремя любыми взаимно перпендикулярными осями, проходящими через неподвижную точку, равна единице. Поэтому квадраты трех сумм моментов сил относительно этих осей равны квадрату наибольшего момента.

Для равновесия системы жестко связанных между собой тел, могущей двигаться вокруг неподвижной точки, сумма моментов сил по отношению к любой оси, проходящей через эту точку, должна равняться нулю. Из предыдущего следует, что это имеет место, если эта сумма равна нулю по отношению к трем неподвижным взаимно перпендикулярным осям. Если в системе нет неподвижной точки, то для равновесия,

кроме того, необходимо, чтобы три суммы сил, разложенные параллельно этим осям, каждая в отдельности, были равны нулю.

Рассмотрим систему весомых точек, жестко связанных между собой и отнесенных к трем взаимно перпендикулярным плоскостям, связанным с системой. Разлагая действие силы тяжести параллельно пересечениям этих плоскостей, можно все силы, параллельные одной и той же плоскости, свести к единой равнодействующей, параллельной этой плоскости и равной их сумме. Три полученные равнодействующие, соответствующие трем плоскостям, должны встретиться в одной точке, так как воздействия силы тяжести на разные точки системы параллельны и имеют единую равнодействующую, которую можно получить, складывая сперва две силы, затем их равнодействующую с третьей, равнодействующую трех сил с четвертой и т. д. Положение точки встречи по отношению к системе не зависит от наклона плоскостей к направлению силы тяжести, так как больший или меньший наклон меняет лишь значения трех равнодействующих, не изменяя их положения относительно плоскостей. Если эта точка неподвижна, все действия силы тяжести в системе уничтожатся во всех возможных ее положениях, которые она может принять, вращаясь вокруг этой точки, названной поэтому *центром тяжести системы.*

Представим себе, что положение этого центра и положения разных точек системы определены координатами, параллельными трем взаимно перпендикулярным осям. Так как действия сил тяжести равны и параллельны и их равнодействующая проходит через центр тяжести системы при любых ее положениях, то если предположить, что эта равнодействующая последовательно параллельна каждой из трех осей, равенство момента равнодействующей сумме моментов составляющих приводит к тому, что любая из координат этого центра, умноженная на полную массу системы, равна сумме произведений массы каждой точки на соответствующую ей координату. Таким образом, определение центра тяжести не зависит от самой тяжести, породившей мысль о нем. Рассмотрение этого центра применительно к системам весомых или невесомых тел, свободных или связанных между собой каким-либо образом, очень полезно в механике.

Обобщая теорему о равновесии точки, рассмотренную в конце первой главы, мы приходим к следующей теореме, которая заключает в наиболее общем виде условия равновесия системы материальных точек, движимых какими-либо силами.

Если изменить положение системы на бесконечно малую величину, так, чтобы не нарушились связи между ее частями, каждая материальная точка подвинется в направлении увлекающей ее силы на величину, равную части этого направления, заключенной между первым положением точки и перпендикуляром, опущенным из ее второго положения на это направление. Установив это, получим:

*в состоянии равновесия сумма произведений каждой силы на величину перемещения в ее направлении каждой точки, к которой она приложена, равна нулю. И обратно: если эта сумма равна нулю, каково бы ни было изменение системы, она находится в равновесии.*

В этом заключается принцип возможных скоростей, открытый Жаном Бернулли. Но чтобы его использовать, надо произведения, о которых шла речь, относящиеся к точкам, которые при изменении положения системы перемещаются в направлении, противоположном действию приложенных к ним сил, взять с обратным знаком. К тому же надо помнить, что сила есть произведение массы материальной точки на скорость, которую она бы приобрела под действием этой силы, если бы была свободной.

Если положение каждой точки системы определять тремя прямоугольными координатами, сумма произведений каждой силы, действующей на точку, на величину ее перемещения при бесконечно малом перемещении всей системы выражается линейной функцией изменения координат точек системы. Эти изменения находятся между собой в отношениях, вытекающих из связи частей системы. Сводя с помощью этих отношений произвольные изменения к наивозможно меньшему числу, в предыдущей сумме, которая при равновесии системы должна равняться нулю, чтобы равновесие имело место при любом положении системы, нужно отдельно приравнять нулю коэффициент каждого из оставшихся изменений, что даст столько уравнений, сколько имеется таких произвольных изменений. Эти уравнения вместе с уравнениями, которые даются связью всех частей системы, будут включать все условия равновесия системы.

Существует два очень различных состояния равновесия. При одном из них, если немного нарушить равновесие, все тела системы совершают лишь небольшие колебания вокруг их начального положения. Такое равновесие называют *устойчивым равновесием*. Эта устойчивость абсолютна, если она имеет место при любых колебаниях системы, и относительна, если сохраняется только при колебаниях определенного рода. В другом состоянии равновесия тела, если их отклонили, удаляются все больше и больше от своего первоначального положения. Можно ясно представить себе эти два состояния равновесия, рассматривая эллипс, поставленный вертикально на плоскость. Если эллипс, находящийся в равновесии на своей малой оси, отклонить немного от этого положения, он стремится вернуться в исходное положение, делая колебания, которые вскоре погасятся трением и сопротивлением воздуха. Но если эллипс находится в равновесии на большой оси, то, однажды отклонившись от этого положения, он стремится отклониться все больше и в конце концов опрокидывается на свою малую ось. Таким образом, устойчивость равновесия зависит от свойства малых колебаний, которые делает система вокруг положения равновесия, будучи каким-либо способом из него выведена. Чтобы определить в общем виде, каким образом устойчивые и неустойчивые состояния равновесия следуют одно за другим, рассмотрим замкнутую кривую, поставленную вертикально в положение устойчивого равновесия. Выведенная немного из этого положения, она стремится к нему вернуться. Это стремление изменяется по мере увеличения отклонения, и когда это стремление делается равным нулю, кривая оказывается в новом, но уже неустойчивом состоянии равновесия, потому что прежде чем прийти к этому положению, она стремилась вер-

нуться к своему первоначальному положению. После этого второго положения стремление к первому положению и, следовательно, ко второму делается отрицательным до тех пор, пока оно снова не станет нулевым, и тогда кривая снова оказывается в устойчивом равновесии. Продолжая таким образом, мы видим, что состояния устойчивого и неустойчивого равновесия сменяются поочередно, подобно максимумам и минимумам ординат кривых. То же рассуждение легко распространить на различные состояния равновесия системы тел.

## Глава IV

## О РАВНОВЕСИИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Характерным свойством как сжимаемых, так и несжимаемых жидкостей и газов является легкость, с которой каждая из их молекул подчиняется самому легкому давлению, испытываемому ею с одной стороны в большей степени, чем с другой. Поэтому, основываясь на этом свойстве, мы установили законы равновесия жидкостей и газов, считая их состоящими из бесконечного числа молекул, вполне подвижных относительно друг друга.

Из этой подвижности прежде всего следует, что сила, приложенная к молекуле, находящейся на свободной поверхности жидкости, должна быть перпендикулярна к этой поверхности, так как если бы она была к ней наклонена, то, разложив ее на две составляющие: одну — перпендикулярную к поверхности, а другую — параллельную ей, мы бы увидели, что молекула перемещается в направлении этой последней составляющей. Таким образом, сила тяжести перпендикулярна к поверхности стоячей воды, которая вследствие этого горизонтальна. По этой же причине давление, оказываемое каждой молекулой жидкости на поверхность, должно быть ей перпендикулярно.

Каждая молекула внутри жидкости или газа испытывает давление, которое в атмосфере измеряется высотой ртути в барометре и во всякой другой жидкости или газе может быть измерено подобным же образом. Если представить себе молекулу как бесконечно малую прямоугольную призму, то давление окружающей ее среды будет перпендикулярно ее граням, и, следовательно, она будет стремиться прийти в движение, перпендикулярное каждой грани из-за разности давлений, оказываемых этой средой на две ее противоположные грани. Из-за этих разностей давлений возникают три взаимно перпендикулярные силы, которые следует сложить с другими силами, действующими на молекулу. Нетрудно сделать вывод, что в состоянии равновесия дифференциал давления равен плотности молекулы жидкости, умноженной на сумму произведений каждой силы на элемент ее направления. Эта сумма является точным дифференциалом, если жидкость несжимаема и однородна. Этот важный результат впервые получен Клеро и был им опубликован в его прекрасной работе о *фигуре Земли*.

Когда силы являются результатом притяжения, они всегда определяются функцией расстояния от центров притяжения, и произведение каждой силы на элемент направления определяется точным дифференциалом. Поэтому плотность молекулы жидкости или газа должна быть функцией давления, так как дифференциал давления, разделенный на эту плотность, является точной разностью. Таким образом, все слои жидкости или газа, в которых давление постоянно, имеют одинаковую плотность на всем своем протяжении. Равнодействующая всех сил, приложенных к каждой молекуле на поверхности этих слоев, перпендикулярна к этой поверхности, вдоль которой скользила бы молекула, если бы эта равнодействующая была к ней наклонена. Эти слои были вследствие этого названы *уровенными поверхностями*.

*Плотность* молекулы атмосферного воздуха есть функция давления и температуры. Ее вес почти в точности является функцией высоты над поверхностью Земли. Если бы ее температура тоже была функцией этой высоты, уравнение равновесия атмосферы было бы дифференциальным уравнением, связывающим давление и температуру, и равновесие было бы возможно всегда. Но в природе в разных частях атмосферы температура зависит еще от широты, от присутствия Солнца и от тысячи других переменных или постоянных причин, которые должны создавать в этой большой массе воздуха движения, часто очень значительные.

В силу подвижности своих частей весомая жидкость может создавать давления, гораздо большие своего веса. Так, например, узкий столб воды, оканчивающийся широкой горизонтальной поверхностью, давит на основание, на котором эта поверхность находится, так же, как цилиндр воды такой же высоты и с таким же основанием. Чтобы лучше ощутить верность этого парадокса, представим себе неподвижный цилиндрический сосуд с горизонтальным подвижным дном. Предположим, что этот сосуд наполнен водой и его дно поддерживается уравновешивающей силой, равной и противоположной испытываемому им давлению. Ясно, что равновесие продолжало бы существовать, если бы часть воды затвердела и соединилась со стенками сосуда, поскольку равновесие системы тел не нарушится, если предположить, что некоторые из них объединились или соединились с неподвижными точками. Так можно создать бесчисленное множество сосудов различных форм, но с днищами и высотами, равными, соответственно, дну и высоте цилиндрического сосуда, в которых вода будет производить такое же давление на подвижное дно.

В общем случае, если жидкость действует только своим весом, давление, которое она создает на какую-либо площадь, равно весу столба этой жидкости, основание которого равно сжимаемой поверхности, а высота — расстоянию от ее центра тяжести до поверхности уровня жидкости.

Тело, погруженное в жидкость или газ, теряет часть своего веса, равную весу вытесненного им объема жидкости или газа. Так как до погружения тела окружающая жидкость (или газ) уравновешивала вес этого объема жидкости (или газа), который, не нарушая равновесия системы, мы можем себе представить затвердевшим, равнодействующая всех воз-

действий жидкости (или газа) на эту массу должна уравновешивать ее вес и проходить через ее центр тяжести. Но совершенно ясно, что эти воздействия будут теми же, что и воздействия на тело, занимающее его место, и, таким образом, действие жидкости (или газа) уничтожает часть веса этого тела, равную весу вытесненной жидкости (или газа). Поэтому в воздухе тело весит меньше, чем в пустоте. Этой разницей, в большинстве случаев мало заметной, не следует пренебрегать при выполнении точных экспериментов.

С помощью весов, на одном конце коромысла которых подвешено тело, погружаемое в жидкость, можно точно измерить уменьшение его веса, происходящее при этом погружении, и определить его *удельный вес* или плотность по отношению к плотности жидкости. Удельный вес равен отношению веса тела в пустоте к его уменьшению при полном погружении в жидкость. Именно путем сравнения с максимумом плотности дистиллированной воды и были измерены удельные веса тел.

Чтобы тело, более легкое, чем жидкость, находилось в равновесии на ее поверхности, надо, чтобы его вес был равен весу объема вытесненной им жидкости. Кроме того, надо, чтобы центры тяжести этого объема жидкости и тела находились на одной вертикали, так как равнодействующая силы тяжести, действующей на все молекулы тела, проходит через его центр тяжести, а равнодействующая всех действий жидкости на это тело проходит через центр тяжести вытесненного объема жидкости. Эти равнодействующие, чтобы взаимно уничтожиться, должны располагаться на одной общей вертикали так же, как и центры тяжести. Но для устойчивости равновесия к двум предыдущим условиям необходимо добавить еще другие. Устойчивость можно всегда определить по следующему правилу.

Если провести сечение плавающего тела поверхностью жидкости и через центр тяжести этого сечения вообразить такую горизонтальную ось, чтобы сумма произведений каждого элемента сечения на квадрат его расстояния от этой оси была наименьшей по сравнению со всеми другими горизонтальными осями, проведенными через эту точку, то равновесие устойчиво во всех направлениях, если эта сумма превосходит произведение объема вытесненной жидкости на высоту центра тяжести тела над центром тяжести этого объема. Это правило особенно важно при строительстве судов, которым следует дать достаточную устойчивость, необходимую для сопротивления волнам и ветру. В корабле ось, проведенная из кормы к носу, и есть та ось, по отношению к которой упомянутая сумма минимальна. Поэтому, используя это правило, легко определить его остойчивость.

Две жидкости, заключенные в один сосуд, располагаются таким образом, что более тяжелая занимает низ сосуда, и поверхность, которая их разделяет, горизонтальна.

Когда две жидкости (или два газа) сообщаются с помощью очень широкой изогнутой трубки, поверхность, разделяющая их, при состоянии равновесия почти горизонтальна. Их высоты над этой поверхностью обратны их удельным весам. Поэтому если предположить, что вся атмо-

сфера имеет плотность, равную плотности воздуха при температуре тающего льда и сжата давлением в 76 сантиметров ртутного столба, ее высота оказалась бы равной 7963 м. Но так как плотность слоев атмосферы уменьшается по мере поднятия над уровнем моря, высота атмосферы гораздо больше.

## Глава V

### О ДВИЖЕНИИ СИСТЕМЫ ТЕЛ

Рассмотрим сначала действие двух материальных точек разной массы, которые, двигаясь по одной прямой, столкнулись между собой. Можно представить себе, что непосредственно перед соударением их движение разложено на одну общую скорость и две такие взаимно противоположные скорости, что, обладая только ими, эти точки уравновесились бы. Общая скорость двух точек не изменяется от их взаимодействия. Поэтому она сохранится и после столкновения. Для ее определения заметим, что количество движения двух точек в силу этой общей скорости, вместе с суммой количеств движения, вызванных уничтоженными скоростями, представляет сумму количеств движения перед соударением, если только количества движения взять с разными знаками, т. е. с противоположными скоростями. Но, по условию равновесия, сумма количеств движения, вызванных уничтоженными скоростями, равна нулю. Поэтому количество движения, вызванное общей скоростью, равно количеству, которое существовало вначале у обеих точек. Следовательно, эта скорость равна сумме количеств движения, разделенной на сумму масс.

Случай соударения двух материальных точек — чисто идеальный. Но с ним легко сопоставить случай соударения каких-либо двух тел, отметив, что если тела соударяются, двигаясь по прямой, проходящей через их центры тяжести перпендикулярно к поверхности их контакта, они действуют друг на друга так, будто их массы были сосредоточены в этих центрах. Поэтому движение передается между ними так же, как между двумя материальными точками, массы которых, соответственно, равны массам рассматриваемых тел.

В предыдущем примере предполагается, что после соударения оба тела должны иметь общую скорость. Можно понять, что это справедливо для мягких тел, у которых передача движения происходит постепенно, незаметными изменениями, так как очевидно, что с того момента, когда ударенное тело приобретает скорость ударяющего тела, всякое взаимодействие между ними прекращается. Но между двумя абсолютно твердыми телами соударение происходит мгновенно, и не представляется обязательным, чтобы после него их скорости были одинаковы. Их взаимная непроницаемость требует только, чтобы скорость ударяющего тела была меньшей. В остальном она неопределенна. Эта неопределенность доказывает абсурдность гипотезы абсолютной твердости. В самом деле, в природе самые твердые тела, если и не упруги, то во всяком случае

имеют некоторую неуловимую мягкость, которая делает их взаимные воздействия постепенными, хотя их продолжительность неощутима.

Когда тела абсолютно упруги, чтобы получить их скорость после соударения, нужно прибавить или вычесть из общей скорости, которую они получили бы, не будучи упругими, скорость, которую они приобрели бы или утратили в этом случае, так как совершенная упругость удваивает эти эффекты при упругой отдаче после вызванного ударом сжатия. Таким образом, скорость каждого тела после удара получают вычитанием его скорости перед ударом из удвоенной общей скорости.

Отсюда легко заключить, что сумма произведений масс на квадраты их скоростей остается одинаковой до и после соударения двух тел. Это же имеет место и при соударениях любого числа идеально упругих тел, при любом способе взаимодействия между ними.

Таковы законы передачи движения, подтверждаемые опытом и математически вытекающие из двух фундаментальных законов движения, которые мы изложили во второй главе этой книги. Многие философы пробовали их вывести, рассматривая конечные причины. Декарт, убежденный, что количество движения без учета его направления должно всегда оставаться неизменным во вселенной, вывел из этой ложной гипотезы ложные законы передачи движения. Они являются поучительным примером ошибок, которым подвергаются те, кто ищет разгадки законов природы по ее вымышленным свойствам.

Когда тело получает импульс в направлении, проходящем через его центр тяжести, все его части двигаются с одинаковой скоростью. Если же это направление проходит в стороне от этого центра, разные части тела получают неодинаковые скорости, и из-за этого неравенства возникает вращение тела вокруг его центра тяжести, в то время как сам этот центр уносится со скоростью, которую он бы принял, если бы направление импульса проходило через центр тяжести. Именно это мы имеем в случае Земли и других планет. Итак, чтобы объяснить двойное — вращательное и поступательное — движение Земли, достаточно предположить, что она вначале получила импульс, направление которого прошло на небольшом расстоянии от ее центра тяжести, расстоянии, которое при предположении, что эта планета однородна, равно приблизительно $^1/_{160}$ части ее радиуса. Бесконечно мало вероятно, чтобы все силы, сообщившие первоначальное движение планетам, их спутникам и кометам, точно прошли бы через их центры тяжести. Поэтому все эти тела должны вращаться вокруг самих себя. По подобной же причине Солнце, тоже имеющее вращательное движение, должно было получить импульс, который, не пройдя через его центр тяжести, уносит его в пространство вместе с планетной системой, если только импульс обратного направления не уничтожит это движение, что кажется невероятным.

Импульс, сообщенный однородной сфере в направлении, не проходящем через ее центр, заставляет ее непрерывно вращаться вокруг диаметра, перпендикулярного плоскости, проходящей через ее центр и через направление приложенной силы. Новые силы, увлекающие все ее точки, равнодействующая которых проходит через ее центр, не изменяют па-

раллельность ее оси вращения. Поэтому ось вращения Земли остается всегда почти точно параллельной самой себе при обращении вокруг Солнца; при этом не возникает необходимости предполагать, подобно Копернику, существование годичного движения полюсов Земли вокруг полюсов эклиптики.

Если тело имеет произвольную форму, его ось вращения может непрерывно изменяться. Исследование этих изменений при любых силах, действующих на тело, является наиболее интересной проблемой механики твердых тел вследствие ее связи с предварением равноденствий и с либрацией Луны.* Разрешая эту проблему, пришли к любопытному и очень полезному результату, а именно, в каждом теле существуют три взаимно перпендикулярные оси, проходящие через его центр тяжести, вокруг которых тело может равномерно и непрерывно вращаться, если оно не подвержено действию внешних сил. Поэтому эти оси названы *главными осями вращения*. Они обладают тем свойством, что сумма произведений силы каждой молекулы тела на квадрат ее расстояния до оси максимальна по отношению к двум из этих осей и минимальна относительно третьей.[29] Если представить себе тело вращающимся вокруг оси, слегка наклоненной по отношению к одной из двух первых осей, мгновенная ось вращения тела отклонится от них на очень малую величину. Поэтому вращение будет устойчивым по отношению к этим двум первым осям и не будет устойчивым относительно третьей; малые отклонения от них мгновенной оси вращения вызовут большие колебания тела вокруг третьей оси.

Весомое тело или система тел любой формы, колеблясь относительно неподвижной горизонтальной оси, образуют сложный маятник. В природе нет других маятников. Простые маятники, о которых мы раньше говорили, представляют лишь чисто геометрические абстракции, служащие для упрощения предмета. Легко привести сложные маятники к простому, если у сложного маятника все части неподвижно связаны между собой. Если умножить длину простого маятника, продолжительность колебания которого равна продолжительности колебания сложного маятника, на массу последнего и на расстояние от его центра тяжести до оси качания, произведение будет равно сумме произведений [массы] каждой молекулы сложного маятника на квадрат ее расстояния до той же оси. По этому правилу, найденному Гюйгенсом, опыты со сложными маятниками позволили узнать длину простого маятника, отбивающего секунды.

Представим себе маятник, делающий очень малые колебания в одной и той же плоскости, и предположим, что в тот момент, когда он максимально отклонился от вертикали, к нему приложили небольшую силу, перпендикулярную плоскости его качания. Он опишет эллипс вокруг вертикали. Чтобы представить себе его движение, можно вообразить фиктивный маятник, продолжающий свои колебания как и реальный маятник, но без приложенной к нему новой силы, тогда как реальный маятник качается, под воздействием этой силы по обе стороны идеального

* Имеется в виду физическая либрация Луны (См. комм. 2, ред.).

маятника, как если бы этот фиктивный маятник был неподвижен и вертикален. Таким образом, движение реального маятника является результатом двух простых колебаний, происходящих одновременно и перпендикулярно друг другу.

Этот способ анализа малых колебаний тел может быть распространен на любую систему. Если предположить, что система выведена из состояния равновесия очень малыми импульсами и затем ей сообщены еще новые импульсы, она будет колебаться по отношению к последовательным состояниям, которые она приняла в силу первых импульсов, таким же образом, каким она колебалась бы по отношению к состоянию своего равновесия, как если бы в этом состоянии ей были сообщены только новые импульсы. Очень малые колебания системы тел, как бы они ни были сложны, могут поэтому рассматриваться как сформированные из простых колебаний, в точности подобных колебаниям маятника. В самом деле, если представить себе систему первоначально в состоянии покоя и затем очень незначительно выведенную из состояния равновесия так, чтобы сила, действующая на каждое тело, стремилась вернуть его в положение, которое оно занимало в этом состоянии, и, кроме того, была пропорциональна расстоянию тела от этой точки, то ясно, что это будет иметь место во время колебания системы, и в каждый момент скорости разных тел будут пропорциональны их расстояниям от положения равновесия. Поэтому все тела одновременно придут в это положение и будут колебаться как простой маятник. Но предположенное нами нарушение равновесия системы — не единственно возможное. Если отдалить одно из тел от его положения равновесия и искать положения других тел системы, которые удовлетворяли бы предыдущим условиям, мы придем к уравнению, степень которого равна числу тел системы, подвижных относительно друг друга. Для каждого тела это дает столько видов простых колебаний, сколько имеется тел. Представим себе, что у системы — колебания первого вида, и в некоторый момент мысленно все тела отдалим от их положений, пропорционально величинам, соответствующим колебаниям второго вида. В силу сосуществования колебаний система будет колебаться по отношению к последующим состояниям, которые она имела бы при колебаниях первого вида, так же, как если бы она имела колебания только второго вида вокруг своего равновесного состояния. Ее движение, таким образом, будет сформировано из двух видов колебаний. Подобным же образом с этим движением можно скомбинировать третий вид колебаний и, продолжая комбинировать все эти виды колебаний самым общим способом, путем синтеза составить все возможные движения системы, лишь бы они были очень малы. И, наоборот, путем анализа можно разложить движения на простые колебания. Отсюда следует простой способ распознавания абсолютной устойчивости равновесия системы тел. Если во всех положениях, относящихся ко всем видам колебаний, силы стремятся возвратить тела в состояние равновесия, это состояние будет устойчивым. Оно таким не будет или будет иметь только относительную устойчивость, если в некоторых из положений системы силы стремятся отдалить тела от положения равновесия.

Ясно, что этот способ анализа очень малых движений системы тел может быть распространен даже на жидкости и газы, колебания которых являются результатом простых, одновременно существующих и часто бесчисленных колебаний.

В распространении волн мы имеем наглядный пример сосуществования очень малых колебаний. Если в некоторой точке возбудить поверхность стоячей воды, мы увидим, как формируются и распространяются от этой точки круговые волны. Возбуждая поверхность в другой точке, мы создадим новые волны, которые смешиваются с первыми. Они накладываются на поверхность, возмущенную первыми волнами, как расположились бы на этой поверхности, если бы она была спокойной, так что их можно хорошо отличить в смеси волн. То, что глаз различает в случае волн на воде, ухо распознает в звуках, или колебаниях воздуха, которые распространяются одновременно, не изменяясь, и очень хорошо различимы между собой.

Принцип сосуществования простых колебаний, установленный Даниилом Бернулли, является одним из тех общих результатов, которые пленяют воображение той легкостью, с которой они позволяют ему представлять явления и их последовательные изменения. Он легко выводится математически из аналитической теории малых колебаний системы тел. Эти колебания зависят от дифференциальных линейных уравнений, полные интегралы которых представляются суммой частных интегралов. Таким образом, простые колебания накладываются одно на другое и образуют движение системы, как выражающие их частные интегралы складываются вместе, чтобы образовать полный интеграл. Таким способом в явлениях природы интересно прослеживать интеллектуальные истины анализа. Это соответствие, многочисленные примеры которого являет нам система мира, составляет одно из самых больших очарований математического мышления.

Естественно желание привести к одному основному принципу законы движения тел, подобно тому, как законы их равновесия были сведены в едином принципе возможных скоростей. Для этого рассмотрим движение системы тел, воздействующих друг на друга, но не подверженных действию ускоряющих сил. Их скорости изменяются в каждый момент. Но можно представить себе каждую из этих скоростей в некоторый момент составленной из скорости, действующей в следующий момент, и другой скорости, которая должна уничтожиться в начале этого второго момента. Если бы уничтоженная скорость была известна, было бы легко, по закону разложения сил, вывести скорость тел во второй момент; однако известно, что если бы тела двигались только под воздействием этих уничтоженных скоростей, они пришли бы во взаимное равновесие. Таким образом, законы равновесия дадут соотношения утраченных скоростей, и из этих соотношений будет легко вывести оставшиеся скорости и их направления. Так, с помощью анализа бесконечно малых можно получить последовательные изменения движения системы и ее положение на любой момент.

Ясно, что если тела подвержены действию ускоряющих сил, всегда

можно применить те же разложения скоростей. Но тогда должно иметь место равновесие между уничтоженными скоростями и именно этими силами.

Этот способ приведения законов движения к законам равновесия, которым мы обязаны главным образом Даламберу, является общим и очень ясным. Можно было бы удивляться, что он ускользнул от геометров, занимавшихся динамикой раньше Даламбера, если бы не было известно, что самые простые идеи почти всегда последними приходят человеческому уму.

Оставалось еще объединить изложенный нами принцип с принципом возможных скоростей, чтобы придать механике все то совершенство, на которое она способна. Это сделал Лагранж, и таким путем свел исследование движения любой системы тел к интегрированию дифференциальных уравнений. Этим заканчивается задача механики, и завершить решение проблемы придется чистому анализу. Вот самый простой способ составления дифференциальных уравнений движения некоторой системы тел.

Если вообразить три взаимно перпендикулярные неподвижные оси и в некоторый момент разложить скорости каждой материальной точки системы тел на три другие, параллельные этим осям, можно рассматривать каждую отдельную скорость как равномерную в этот момент. Затем, в конце момента, можно представить себе эту точку под воздействием трех скоростей, параллельных одной из осей, а именно: ее скорости в этот момент, небольшого изменения, которое скорость получает в следующий момент, и этого же изменения, приложенного в обратном направлении. Две первые из этих скоростей существуют в следующий момент. Третья должна быть уничтожена силами, увлекающими точку, и действием других точек системы. Таким образом, полагая, что мгновенные изменения частных скоростей каждой точки системы приложены к этим точкам в обратном направлении, мы получим систему, которая в силу этих изменений и действующих на нее сил должна находиться в равновесии. Уравнения этого равновесия получаются с помощью принципа возможных скоростей. Комбинируя их с уравнениями, связывающими части системы, получим дифференциальные уравнения движения каждой из ее точек.

Ясно, что подобным же способом можно привести и законы движения жидкостей и газов к законам их равновесия. В этом случае условия, относящиеся к связи между частями системы, сводятся к тому, чтобы объем любой молекулы оставался неизменным, если жидкость несжимаема, и чтобы он зависел от давления по заданному закону, если жидкость упруга и сжимаема. Уравнения, выражающие эти условия и изменения движения жидкостей и газов, включают частные разности каждой из координат молекулы, взятые либо по отношению к времени, либо по отношению к первоначальным координатам. Интегрирование такого рода уравнений представляет большие трудности, и до сих пор оно удалось лишь в отдельных случаях, относящихся к движению весомой жидкости в сосудах, к теории звука и к колебаниям морей и атмосферы.

Рассмотрение дифференциальных уравнений движения системы тел привело к открытию нескольких весьма полезных принципов механики, являющихся развитием тех, которые были нами представлены при описании движения точки во II главе этой книги.

Материальная точка движется равномерно по прямой, если она не испытывает посторонних воздействий. В системе тел, действующих друг на друга, но не подверженных действию внешних сил, общий центр тяжести движется равномерно по прямой, и его движение таково, как если бы все тела были сосредоточены в этой точке и все силы, увлекающие их, непосредственно приложены к ней, так что направление и величины их равнодействующей остаются постоянно неизменными.

Мы видели, что радиус-вектор тела, подверженного действию силы, направленной к неподвижной точке, описывает площади, пропорциональные времени. Если предположить, что система тел, действующих друг на друга каким-либо способом, подвержена действию силы, направленной к неподвижной точке, и если из этой точки к каждому из тел провести радиус-вектор и спроектировать их на неизменную плоскость, проходящую через эту точку, сумма произведений массы каждого тела на площадь, описанную проекцией его радиуса-вектора, пропорциональна времени. В этом состоит *принцип сохранения площадей.*

Если нет неподвижной точки, притягивающей систему, или она подвержена только взаимному действию ее частей, за начало радиусов-векторов можно взять любую точку.

Произведение массы тела на площадь, описанную проекцией его радиуса-вектора за единицу времени, равно проекции полной силы этого тела, умноженной на перпендикуляр, опущенный из неподвижной точки на направление спроектированной таким способом силы. Это последнее произведение представляет момент силы, вращающей систему вокруг оси, перпендикулярной к плоскости проекции и проходящей через неподвижную точку. Итак, принцип сохранения площадей сводится к тому, что сумма окончательных сил, вращающих систему вокруг какой-либо оси, проходящей через неподвижную точку, в состоянии равновесия равная нулю, постоянна в состоянии движения. Представленный таким способом этот принцип подходит для всех возможных законов, которые могли бы связывать силу и скорость.

*Живой силой* системы называют сумму произведений массы каждого тела на квадрат его скорости. Когда тело движется по кривой или по поверхности, не испытывая действия посторонних сил, его живая сила все время остается постоянной, так как постоянна его скорость. Если тела системы не испытывают других взаимодействий, кроме их взаимного притяжения и давления либо непосредственно, либо посредством нерастяжимых и не упругих стержней и нитей, живая сила системы постоянна даже в том случае, если некоторые из ее тел принуждены двигаться по кривым линиям и поверхностям. Этот принцип, названный *принципом сохранения живых сил,* распространяется на все возможные законы, связывающие силу и скорость, если под живой силой тела

понимать удвоенный интеграл произведения его скорости на дифференциал приложенной к нему конечной силы.

При движении тела, побуждаемого какими-либо силами, изменение живой силы равно удвоенному произведению массы тела на сумму ускоряющих сил, умноженных, соответственно, на величины элементарных перемещений тела в направлении к началам этих сил. В движении системы тел удвоенная сумма всех этих произведений равна изменению живой силы системы.

Представим себе, что при движении системы все тела под влиянием приложенных к ним ускоряющих сил в одно и то же время приходят в положение равновесия. Изменение живой силы, по принципу возможных скоростей, будет равно нулю. Поэтому живая сила тогда будет максимальна или минимальна. Если бы система двигалась лишь посредством простых колебаний только одного вида, тела, выходя из положения равновесия, стремились бы к нему вернуться, если равновесие — устойчивое. Их скорости уменьшались бы по мере удаления от этого положения, и, следовательно, в этом положении живая сила имела бы максимум. Но если равновесие неустойчивое, тела, отдалившись от него, стремились бы удалиться еще дальше, их скорости возрастали бы и живая сила была бы в этом случае минимальна. Отсюда можно заключить, что если живая сила постоянно максимальна, когда все тела системы приходят в состояние равновесия одновременно, то, какова бы ни была их скорость, равновесие устойчиво. И наоборот, как абсолютная, так и относительная устойчивость отсутствуют, если живая сила в этом положении минимальна.

Наконец, мы видели во II главе, что сумма интегралов произведений каждой конечной силы системы на элемент ее направления, сумма, которая в состоянии равновесия равна нулю, в состоянии движения становится минимальной. В этом состоит *принцип наименьшего действия*, отличающийся от принципов равномерного движения центра тяжести, сохранения площадей и сохранения живых сил тем, что эти принципы суть истинные интегралы дифференциальных уравнений движения тел, тогда как принцип наименьшего действия — особое сочетание этих самых уравнений.

Так как конечная сила тела есть произведение его массы на скорость, а скорость, умноженная на путь, пройденный за элемент времени, равна произведению этого элемента на квадрат скорости, то принцип наименьшего действия может быть выражен следующим образом.

Интеграл живой силы, умноженный на элемент времени, минимален. Таким образом, истинная экономия природы сводится к экономии живой силы. Эту экономию нужно иметь в виду при конструировании машин, которые тем совершеннее, чем меньшую живую силу они затрачивают для производства определенного действия. Если тела не подчинены никакой ускоряющей силе, живая сила системы постоянна. Поэтому система переходит от одного положения к любому другому за кратчайшее время.

О применимости этих принципов надо сделать важное замечание. Принцип равномерного движения центра тяжести и принцип сохранения площадей остаются в силе даже в случае, если из-за взаимного действия тел возникают резкие изменения в их движениях, и это делает эти принципы очень полезными при многих обстоятельствах. Что же касается принципа сохранения живых сил и принципа наименьшего действия, то они предусматривают, чтобы изменения в движении системы происходили постепенно, неощутимыми переходами.

Если система подвергается резким изменениям под влиянием взаимного действия тел или при встрече с препятствиями, живая сила при каждом таком изменении претерпевает уменьшение, равное сумме произведений каждого тела на квадрат его утраченной скорости; если представить себе, что его скорость, существовавшая до этого времени, разложена на две, из которых одна — остается, а другая — уничтожается, то квадрат этой последней, очевидно, равен сумме квадратов отклонений, претерпеваемых в результате этого изменения скорости, разложенной параллельно трем каким-либо взаимно перпендикулярным осям.

Все эти принципы остаются в силе и при относительном движении тел системы, если она увлекается общим движением вместе с центрами сил, которые мы раньше предполагали неподвижными. Эти принципы сохраняются также при относительных движениях тел на Земле, так как невозможно, как мы уже видели, судить об абсолютном движении системы тел единственно только по видимым проявлениям ее относительного движения.

Каковы бы ни были движения системы и изменения, испытываемые ею под влиянием взаимных действий отдельных ее частей, сумма произведений массы каждого тела на площадь, описанную проекцией его радиуса-вектора вокруг общего центра тяжести на плоскости, проходящей через этот центр и всегда остающейся параллельной самой себе, постоянна. Плоскость, на которой эта сумма максимальна, сохраняет параллельное самой себе положение при движении системы. Эта же сумма равна нулю по отношению ко всем плоскостям, проходящим через центр тяжести перпендикулярно плоскости, о которой шла речь. Квадраты трех таких сумм, относящиеся к трем взаимно перпендикулярным плоскостям, проходящим через центр тяжести, равны квадрату вышеупомянутой максимальной суммы. Плоскость, соответствующая этой сумме, имеет еще то замечательное свойство, что сумма проекций площадей, описанных телами вокруг друг друга и умноженных, соответственно, на произведение масс каждых двух тел, соединенных радиусом-вектором, максимальна на этой плоскости и на всех других, параллельных ей. Поэтому во всякий момент можно найти плоскость, которая, проходя через какую-либо из точек системы, всегда сохраняет параллельное положение. Но поскольку две из произвольных постоянных этого движения исчезают, если движение тел отнести к этой плоскости, то естественно выбрать ее в качестве плоскости координат и их начало поместить в центр тяжести системы.

# Книга четвертая

## О ТЕОРИИ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Выдумки мнений день уничтожает,
А суждения природы подтверждает.

Цицерон. О природе богов.

Теперь, когда в предыдущих книгах изложены законы небесных движений и действий движущих сил, остается их сравнить, чтобы узнать силы, движущие тела солнечной системы, причем без каких-либо гипотез, а путем последовательных геометрических рассуждений прийти к принципу всемирного тяготения, из которого эти законы вытекают. Именно в небесном пространстве законы механики наблюдаются с наибольшей точностью. На Земле их результаты осложняет столько обстоятельств, что эти законы трудно распознать и еще труднее подчинить вычислениям. Но движения тел солнечной системы, разделенных громадными расстояниями и подверженных действию главной силы, влияние которой легко вычислить, искажаются только такими малыми силами, что оказалось возможным в основных формулах охватить все изменения в этой системе, уже происшедшие и те, которые должны произойти с течением времени. Здесь нет места неясным причинам, не поддающимся анализу и изменяемым по прихоти воображения, чтобы объяснить явление. Закон всемирного тяготения имеет то преимущество, что поддается вычислениям, и, сравнивая результаты этих вычислений с наблюдениями, можно получить наиболее верный способ подтверждения его существования. Мы увидим, что этот великий закон природы представляет все небесные явления, вплоть до самых малых подробностей; что нет ни одного самого малого неравенства, которое не вытекало бы с удивительной точностью из этого закона, и что часто он опережал наблюдения, открывая нам причины многих странных движений, которые хотя и предвиделись астрономами, но из-за своей сложности и исключительной медленности могли бы быть определены посредством одних только наблюдений лишь через многие века. С помощью этого закона эмпиризм был полностью изгнан из астрономии, являющейся теперь великой проблемой механики, для которой элементы движения светил, их фигуры и их массы — независимые и единственно необходимые данные, которые эта наука должна получать из наблюдений. Потребовалась самая изощренная геометрия для разрешения этой проблемы и для вывода теорий различных явлений, представляемых нам небесами. Я их собрал в моей «Небесной механике». Здесь я ограничусь лишь изложением главных положений этого труда, отмечая путь, по которому следовали геометры, чтобы их получить, и попытаюсь сделать понятными их доводы, насколько это возможно без применения математического анализа.

## Глава I

## О ПРИНЦИПЕ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Среди явлений, наблюдаемых в солнечной системе, эллиптическое движение планет и комет кажется наиболее пригодным, чтобы привести нас к общему закону сил, которые ими движут. Наблюдения показали нам, что площади, описываемые вокруг Солнца радиусами-векторами планет и комет, пропорциональны времени; а в предыдущей книге мы видели, что для этого нужно, чтобы сила, отклоняющая непрерывно каждое из этих тел от прямого пути, была направлена постоянно к началу радиусов-векторов, и, следовательно, стремление планет и комет к Солнцу является необходимым следствием пропорциональности площадей и времени, затраченному на описание их радиусами-векторами.

Чтобы определить закон этого стремления, предположим, что планеты движутся по круговым орбитам; это мало отличается от истины. Тогда квадраты их истинных скоростей пропорциональны квадратам радиусов этих орбит, разделенным на квадраты времени обращения. Но, по законам Кеплера, квадраты этих скоростей относятся между собой как кубы тех же радиусов. Поэтому квадраты скоростей обратно пропорциональны этим радиусам. Раньше мы видели, что центробежные силы многих тел, движущихся по окружностям, относятся между собой как квадраты скоростей, разделенные на радиусы описанных окружностей. Поэтому стремление планет к Солнцу обратно пропорционально квадратам радиусов их орбит, предполагаемых круговыми. Эта гипотеза, правда, не вполне строга, но, поскольку постоянное отношение квадратов времен обращения планет к кубам больших осей их орбит не зависит от эксцентриситета, естественно думать, что оно существует и в случае круговых орбит. Таким образом, закон, по которому тела притягиваются к Солнцу обратно пропорционально квадратам расстояний от него, ясно указывается этим отношением.

Аналогия заставляет нас считать, что этот закон, распространяющийся на все планеты, в равной степени имеет место и для одной и той же планеты на ее разных удалениях от Солнца. Ее эллиптическое движение не оставляет никаких сомнений в этом отношении. Для доказательства проследим это движение, начиная от выхода планеты из перигелия. В это время ее скорость максимальна, и она стремится удалиться от Солнца, преодолевая силу его тяготения; ее радиус-вектор увеличивается и образует с направлением ее движения тупые углы. Сила тяготения, направленная к Солнцу и разложенная по этому направлению, все более и более уменьшает скорость планеты, пока она не достигнет афелия. В этой точке радиус-вектор снова становится перпендикулярным к кривой, скорость минимальна, и, так как стремление удалиться от Солнца меньше, чем сила его притяжения, планета к нему приближается, описывая вторую половину своего эллипса. На этой части пути сила тяготения к Солнцу увеличивает ее скорость, в то время как раньше она ее уменьшала. Планета приходит в перигелий со своей пер-

воначальной скоростью и начинает второе обращение, подобное первому. Поскольку в перигелии и в афелии кривизна эллипса одинакова, оскулирующие радиусы одинаковы, следовательно, и центробежные силы в этих двух точках относятся как квадраты скоростей. Так как секторы, описанные в одинаковые элементы времени, равны, скорости в перигелии и в афелии обратно пропорциональны соответствующим расстояниям планеты от Солнца. Поэтому квадраты этих скоростей обратно пропорциональны квадратам тех же расстояний, а так как в перигелии и в афелии центробежные силы в оскулирующих окружностях, очевидно, равны силе тяготения планеты к Солнцу, эти силы тяготения обратно пропорциональны квадратам расстояний до этого светила.

Таким образом, теоремы Гюйгенса о центробежной силе были достаточны, чтобы узнать закон, описывающий стремление планет к Солнцу, так как очень вероятно, что закон, действительный для всех планет и подтверждающийся для каждой из них в перигелии и в афелии, распространяется на все точки планетных орбит и вообще на все расстояния от Солнца. Но чтобы установить его совершенно неопровержимым образом, было необходимо получить выражение силы, которая, будучи направленной в фокус эллипса, заставляла бы тело описывать эту кривую. Ньютон нашел, что, действительно, эта сила обратно пропорциональна квадрату радиуса-вектора. Надо было еще показать, что сила тяготения к Солнцу не изменяется от одной планеты к другой иначе, чем в зависимости от расстояния до этого светила. Этот великий геометр показал, что это следует из закона пропорциональности квадратов времен обращения кубам больших осей орбит. Если предположить, что все планеты находятся в покое на одинаковых расстояниях от Солнца и предоставлены силам тяготения, направленным к его центру, они бы опустились за равное время на равные расстояния. Этот результат следует распространить и на кометы, хотя большие оси их орбит и неизвестны, так как во второй книге было показано, что величины площадей, описанных их радиусами-векторами, подчинены действию закона пропорциональности квадратов времен их обращения кубам этих осей.

Анализ, который в своих обобщениях охватывает все, что может вытекать из данного закона, показывает нам, что не только эллипс, но и все конические сечения могут быть описаны под влиянием силы, удерживающей планеты на своих орбитах. Поэтому комета может двигаться по гиперболе. Но тогда она была бы видимой только один раз и после появления удалилась бы за пределы солнечной системы, а затем приблизилась бы к новым солнцам, чтобы снова удалиться от них, пробегая различные системы, рассеянные в необъятности небес. Имея в виду бесконечное разнообразие природы, весьма вероятно, что существуют и такие светила. Их появление должно быть очень редким, и мы гораздо чаще наблюдаем кометы, движущиеся по замкнутым орбитам и возвращающиеся через более или менее продолжительное время в области неба, близкие к Солнцу.

Спутники испытывают такое же стремление к этому огромному телу, как и планеты. Если бы Луна не была подвержена его действию, то

вместо того чтобы описывать почти круговую орбиту вокруг Земли, она скоро кончила бы тем, что покинула бы ее. И если бы этот спутник, а также и спутники Юпитера, не увлекались Солнцем, следуя тем же законам, что и планеты, в их движениях появились бы значительные неравенства, которых наблюдение не обнаруживает. Итак, планеты, спутники и кометы — все подчинены одному закону тяготения к этому светилу. Одновременно с тем, как спутники движутся вокруг своих планет, вся система планеты и ее спутников увлекается общим движением в пространстве и удерживается той же силой в своем движении вокруг Солнца. Таким образом, относительное движение планеты и ее спутников почти таково, как если бы планета находилась в покое и не испытывала никакого внешнего воздействия.

Итак, не прибегая к какой-либо гипотезе, а только через неизбежные следствия законов небесных движений, мы приходим к заключению, что центр Солнца является источником силы, которая, распространяясь безгранично в пространстве, уменьшается пропорционально квадрату расстояний и, в соответствии с этим законом, притягивает все тела. Каждый из законов Кеплера раскрывает нам свойства этой притягательной силы: закон площадей, пропорциональных времени, показывает нам, что она постоянно направлена к центру Солнца; эллиптическая форма планетных орбит доказывает, что эта сила уменьшается пропорционально квадрату расстояния; наконец, закон пропорциональности квадратов времен обращения кубам больших осей орбит показывает, что сила тяготения всех тел к Солнцу одинакова на равных расстояниях от него. Мы назовем эту силу тяготения *солнечным притяжением*, потому что, не зная ее причины, мы можем, прибегнув к приему, часто применяемому геометрами, предположить, что эта сила происходит от притягательной способности, заключенной в Солнце.

Погрешности, которым подвержены наблюдения, и небольшие отклонения планет от эллиптического движения оставляют некоторую неуверенность в результатах, извлеченных из законов этого движения; и можно было бы сомневаться в том, что солнечное притяжение действительно уменьшается в точности обратно пропорционально квадратам расстояний. Но как бы мало оно ни отклонялось от этого закона, это отличие было бы очень заметно в движениях перигелиев планетных орбит. Перигелий земной орбиты имел бы годичное движение, равное $200^{cc}$ [64.″8], если бы степень расстояния, которому солнечная сила притяжения обратно пропорциональна, увеличилась только на 1/10000. Но это движение, согласно наблюдениям, равно всего лишь $36.^{cc}4$ [11.″8], и мы увидим в дальнейшем его причину. Закон обратной пропорциональности силы тяготения квадрату расстояния, по крайней мере, исключительно близок к истине, и его большая простота побуждает нас применять его, если наблюдения не потребуют от него отказаться. Конечно, не надо измерять простоту законов природы той легкостью, с которой мы их воспринимаем. Но, когда те из них, которые кажутся нам самыми простыми, вполне согласуются со всеми явлениями, мы имеем все основания рассматривать их как точные.

Притяжение спутников к центрам своих планет есть необходимый результат пропорциональности площадей, описанных их радиусами-векторами, затраченному на это времени, и закон уменьшения притяжения пропорционально квадратам расстояний доказывается эллиптичностью их орбит. Эта эллиптичность мало заметна в орбитах спутников Юпитера, Сатурна и Урана, что затрудняет определение закона, по которому уменьшаются силы притяжения, по движению каждого спутника в отдельности, но постоянное отношение квадратов времен их обращения к кубам больших осей их орбит убедительно указывает, что у каждого спутника сила притяжения к планете обратно пропорциональна квадрату расстояния до ее центра.

Это доказательство неприменимо для Земли, имеющей лишь одного спутника, но его можно заменить следующими соображениями.

Сила тяжести простирается до вершин самых высоких гор, и незначительность изменения, которое она при этом претерпевает, не позволяет сомневаться в том, что на гораздо больших высотах ее действие все еще будет ощутимо. Не естественно ли поэтому распространить его до Луны и полагать, что это светило удерживается на своей орбите тяготением к Земле, так же как планеты удерживаются на своих орбитах солнечным притяжением? В самом деле, эти две силы, по-видимому, одной природы: и та и другая проникают во внутренние части материи и, если их массы одинаковы, наделяют их одинаковыми скоростями. Мы уже видели, что сила солнечного притяжения действует одинаково на все тела, расположенные на равных расстояниях от Солнца, так же как земная сила тяготения заставляет их падать в пустоте с одинаковых высот с равными скоростями. Тело, с силой брошенное горизонтально с большой высоты, падает на Землю в отдалении, описав параболическую кривую. Если бы скорость его полета была около 7000 м в секунду и не погашалась сопротивлением атмосферы, оно не упало бы и продолжало обращаться как спутник вокруг Земли, так как его центробежная сила в этом случае была бы равна силе тяготения. Чтобы из этого тела сделать вторую Луну, достаточно поднять его на такую же высоту, как и это светило, и сообщить ему такое же движение полета.

Но завершает доказательство тождественности стремления Луны к Земле и силы тяжести то, что для получения этого стремления достаточно, чтобы сила земного притяжения уменьшалась, следуя общим законам сил тяготения небесных тел. Рассмотрим некоторые детали, соответствующие важности рассматриваемого предмета.

Сила, непрерывно отклоняющая Луну от касательной к ее орбите, заставляет ее пробегать за одну секунду расстояние, равное синусу-верзусу дуги, которую она описывает за это же время, поскольку этот синус представляет расстояние, на которое Луна в конце секунды удалилась от своего начального направления. Его можно определить по расстоянию Луны от Земли, которое лунный параллакс дает в долях земного радиуса. Но чтобы получить результат, независимый от неравенств лунного движения, надо за ее средний параллакс взять часть параллакса, независящую от этих неравенств и соответствующую большой полуоси лунного

эллипса. Из совокупности большого числа наблюдений лунного параллакса Бюрг определил, что эта его часть равна 10 541$^{cc}$ [3415″] на параллели, квадрат синуса широты которой равен 1/3. Мы выбрали эту параллель, так как притяжение Земли в соответствующих точках ее поверхности, так же как и на расстоянии радиуса лунной орбиты, равно массе Земли, разделенной на квадрат расстояния до ее центра тяжести. Радиус, проведенный из любой точки этой параллели в центр тяжести Земли, равен 6 369 809 м. Отсюда легко заключить, что сила, притягивающая Луну к Земле, заставляет ее падать за одну секунду на 0.00101728 м. В дальнейшем мы увидим, что действие Солнца уменьшает лунное притяжение на 1/358 часть. Поэтому надо увеличить на 1/358 упомянутую выше высоту, чтобы сделать ее независимой от действия Солнца, и тогда она становится равной 0.00102012 м. Но Луна в своем относительном движении вокруг Земли подвержена действию силы, равной сумме масс Земли и Луны, разделенной на квадрат расстояния между ними. Таким образом, чтобы получить расстояние, при котором Луна упала бы за одну секунду под влиянием только одного земного притяжения, надо умножить предыдущее расстояние на отношение массы Земли к сумме масс Земли и Луны. Из совокупности явлений, зависящих от действия Луны, мною было получено, что ее масса равна 1/75 массы Земли. Итак, умножив приведенное выше расстояние на 75/76, мы получим 0.0010067 м — высоту, с которой земное притяжение заставляет падать Луну за одну секунду.

Сравним это расстояние с тем, которое получается в результате наблюдения маятника. На рассматриваемой параллели высота, с которой сила тяжести заставляет падать тело за первую секунду, как было показано в XIV главе первой книги, равна 3.65631 м. Но на этой параллели притяжение Земли меньше силы тяжести на 2/3 центробежной силы, вызываемой вращением на экваторе, а эта сила составляет 1/288 силы тяжести. Поэтому полученное выше расстояние надо увеличить на 1/432 его часть, чтобы получить расстояние, зависящее только от действия Земли, которое на этой параллели равно массе этой планеты, разделенной на квадрат ее радиуса. Таким образом, величина этого расстояния будет 3.66477 м. На расстоянии до Луны оно должно быть уменьшено в отношении квадрата радиуса земного сфероида к квадрату расстояния до этого светила. Очевидно, что для этого достаточно умножить его на квадрат синуса лунного параллакса, равного 10 541$^{cc}$ [3415″]. В результате получим, что расстояние, на которое Луна должна падать за одну секунду вследствие притяжения Земли равно 0.00100464 м. Эта высота, полученная из опытов с маятником, чрезвычайно мало отличается от полученной из непосредственных наблюдений параллакса; и чтобы они совпали, приводившееся выше значение параллакса надо было бы изменить всего приблизительно на 2$^{cc}$ [0.″6]. Поскольку столь малое изменение лежит в пределах погрешностей наблюдений и элементов, использованных для вычислений, можно быть уверенным, что главная сила, удерживающая Луну на своей орбите, есть сила земного притяжения, ослабленная пропорционально квадрату рас-

стояния. Таким образом, закон уменьшения силы тяготения, который для планет, имеющих несколько спутников, доказывается путем сравнения их расстояний и времен их обращения, для Луны доказывается сравнением ее движения с движением тел, бросаемых с поверхности Земли. Уже наблюдения маятников на вершинах гор указывали на уменьшение силы земного тяготения. Но из-за недостаточной высоты гор по сравнению с величиной земного радиуса, этих наблюдений было недостаточно для установления закона. Необходимо было иметь удаленное от нас светило, такое как Луна, чтобы действие этого закона сделалось очень заметным и убедило нас, что сила тяготения на Земле представляет только частный случай силы, распространенной по всей вселенной.

Каждое явление проливает новый свет на законы природы и их подтверждает. Так, сравнение опытов над силой тяжести с лунным движением ясно показывает нам, что при вычислении сил тяготения Солнца и планет за начало расстояний надо принимать их центры тяжести, так как ясно, что это имеет место в случае Земли, сила тяготения которой имеет ту же природу, что и силы тяготения Солнца и планет.

Глубокая аналогия позволяет нам распространить это притягивающее свойство и на планеты, не имеющие спутников. Сферичность, свойственная всем этим телам, ясно указывает, что их молекулы собраны вокруг их центров тяжести силой, которая на равных расстояниях одинаково увлекает их к этим центрам. Эта сила проявляется также в возмущениях, вносимых ею в движение планет. Но следующее соображение не оставляет никакого сомнения в ее существовании. Мы видели, что если бы планеты и кометы были расположены на одинаковых расстояниях от Солнца, их тяготение, направленное к этому светилу, было бы пропорционально их массам; а по всеобщему закону природы, действие равно и обратно противодействию. Таким образом, все эти тела действуют на Солнце и притягивают его соразмерно своим массам. Следовательно, они сами одарены силой притяжения, пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадратам расстояний. По тому же принципу спутники, согласно тому же закону, притягивают к себе планеты и Солнце. Итак, это притягательное свойство оказывается общим для всех небесных тел.

Оно не нарушает эллиптическое движение планет вокруг Солнца, если рассматривать только их взаимное действие. В самом деле, относительное движение системы тел не изменяется, если им сообщается общая скорость. Поэтому, приложив в обратном направлении к Солнцу и к планете движение первого из этих тел и испытываемое им действие со стороны второго, можно считать Солнце неподвижным. Но тогда планета будет притягиваться к нему силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния и прямо пропорциональной сумме их масс, и ее движение вокруг Солнца будет эллиптическим. Из подобного же рассуждения видно, что оно сохранит свою эллиптичность, если предположить, что система, состоящая из Солнца и планеты, уносится общим движением в пространство. Столь же ясно, что эллиптическое движение спут-

ника не нарушается поступательным движением его планеты, а также не нарушалось бы воздействием Солнца, если бы это воздействие было в точности одинаково на планету и на спутник.

Однако воздействие планеты на Солнце влияет на продолжительность ее обращения, которое делается тем короче, чем эта планета больше, поэтому отношение куба большой оси орбиты к квадрату времени обращения пропорционально сумме масс Солнца и планеты. Но поскольку это отношение почти одинаково для всех планет, их массы должны быть очень малы по сравнению с массой Солнца, что в равной мере верно и для спутников, сравниваемых с их планетой. Это же подтверждается объемами рассматриваемых тел.

Притягивающая способность небесных тел свойственна не только их массе в целом, но присуща каждой из их молекул. Если бы Солнце действовало только на центр Земли, не притягивая каждую из ее частей, в океане происходили бы колебания, несравненно большие и очень отличные от наблюдаемых колебаний. Сила притяжения Земли к Солнцу, таким образом, есть результат сил тяготения всех молекул, которые, следовательно, притягивают Солнце сообразно своим массам. Впрочем, каждое тело на Земле тяготеет к ее центру с силой, пропорциональной его массе. Следовательно, оно действует на планету и притягивает ее в той же пропорции. Если бы это было не так и если бы какая-то часть Земли, какой бы маленькой мы ее не предполагали, не притягивала бы другую часть так же, как та притягивает ее, центр тяжести Земли перемещался бы в пространстве под действием тяжести, что совершенно неприемлемо.

Итак, сравнение небесных явлений с законом движения приводит нас к великому закону природы, который гласит:

*все молекулы материи взаимно притягиваются пропорционально массам и обратно пропорционально квадратам расстояний.*

В этом всемирном тяготении уже можно предугадать причину возмущений эллиптического движения. Так как планеты и кометы подвержены взаимным воздействиям, они должны немного отклоняться от законов этого движения, которому они бы точно следовали, если бы подчинялись только действию Солнца. Спутники, движение которых вокруг своих планет возмущается действием их взаимного притяжения и притяжением Солнца, подобным же образом отклоняются от этих законов. Мы видим еще, что молекулы каждого небесного тела, объединенные своим притяжением, должны образовывать почти сферическую массу, и равнодействующая их сил должна быть причиной всех явлений тяжести на поверхности этих тел. Точно так же видно, что вращательное движение небесных тел должно немного изменять их сферическую форму и сплющивать их у полюсов, причем тогда равнодействующая их взаимного влияния, проходя не точно через центр тяжести, должна производить движения их осей вращения, похожие на те, которые были обнаружены наблюдениями. Наконец, можно предугадать, что молекулы океана, неодинаково притягиваемые Солнцем и Луной, должны получать

колебательное движение, подобное приливам и отливам в морях. Но необходимо вывести все эти явления из общего закона тяготения, чтобы придать ему всю ту достоверность, которой обладают физические истины.

## Глава II

## О ВОЗМУЩЕНИЯХ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ

Если бы планеты подчинялись только действию Солнца, они описывали бы вокруг него эллиптические орбиты. Но они влияют одна на другую, а также и на само Солнце. Из-за этих взаимных притяжений происходят возмущения в их эллиптических движениях, замеченные наблюдателями. Эти возмущения необходимо определить, чтобы составить точные таблицы планетных движений. Точное решение этой проблемы превосходит существующие в настоящее время возможности математического анализа, и мы вынуждены прибегать к приближениям. К счастью, малость масс планет по сравнению с массой Солнца, небольшие эксцентриситеты и взаимные наклоны большинства их орбит сильно облегчают эту задачу. Тем не менее она остается еще очень сложной, и необходим самый тонкий и трудный анализ, чтобы из бесконечного множества неравенств, испытываемых планетами, выделить те, которые более заметны, и определить их значения.

Возмущения эллиптического движения планет могут быть разделены на два очень различающихся класса. Одни из них действуют на элементы эллиптического движения и возрастают исключительно медленно. Их называют *вековыми неравенствами*. Другие зависят от расположения планет, либо относительно друг друга, либо относительно их узлов и перигелиев, и восстанавливаются всякий раз, когда эти расположения повторяются. Они были названы *периодическими неравенствами*, чтобы отличить их от вековых неравенств, также являющихся периодическими, но периоды которых гораздо длиннее и не зависят от взаимного расположения планет.

Самый простой способ анализа различных возмущений заключается в том, чтобы вообразить себе планету, движущуюся в согласии с законами эллиптического движения по эллипсу, элементы которого плавно изменяются, и одновременно представить себе, что настоящая планета колеблется вокруг этой воображаемой, по очень маленькой траектории, свойства которой зависят от ее периодических возмущений.

Рассмотрим сперва вековые неравенства, которые, действуя в течение веков, должны за длительное время изменять форму и положение всех планетных орбит. Самое важное из этих неравенств то, которое может повлиять на среднее движение планет. При сравнении между собой наблюдений, сделанных со времени возрождения астрономии, движение Юпитера оказалось более быстрым, а Сатурна более медленным, чем движения, полученные из сравнения этих же наблюдений с древними. Астрономы пришли к заключению, что первое из этих движений уско-

ряется, а второе замедляется от века к веку; и чтобы учесть эти изменения, они ввели в таблицы этих планет два вековых уравнения, возрастающих пропорционально квадратам времени: одно — прибавляемое к среднему движению Юпитера, а другое — вычитаемое из среднего движения Сатурна. Согласно Галлею, вековое ускорение Юпитера равно $106^{cc}$ [34″] для первого столетия, начиная от 1700 г. Соответствующее уравнение Сатурна равно $256.^{cc}94$ [83.″25]. Естественным было искать причину во взаимном действии этих самых значительных в нашей системе планет. Эйлер, первый занявшийся изучением этого вопроса, получил вековое уравнение, одинаковое для обеих планет. Его надо было прибавлять к их средним движениям, что противоречило наблюдениям. Затем Лагранж получил более соответствующие наблюдениям результаты. Другие геометры нашли еще иные уравнения. Пораженный этими разногласиями, я снова исследовал этот вопрос, рассмотрев его с наибольшей тщательностью, и пришел к истинному аналитическому выражению векового движения планет. Подставив в него численные значения величин, относящихся к Юпитеру и Сатурну, я был удивлен, видя, что оно обращалось в нуль. Я догадывался, что это не является исключительной особенностью этих двух планет и что, если полученное мной выражение привести в возможно более простую форму, сведя его к наименьшему числу входящих в него различных величин с помощью существующих между ними зависимостей, все эти члены взаимно уничтожатся. Расчеты подтвердили эту догадку и показали, что, вообще, средние движения планет и их средние расстояния от Солнца неизменны, по крайней мере, если пренебречь четвертыми степенями эксцентриситетов и наклонностей орбит и квадратами возмущающих масс, что более чем достаточно для современных надобностей астрономии. Лагранж впоследствии подтвердил этот результат, показав с помощью очень красивого метода, что он сохраняет силу даже в отношении любых степеней и произведений эксцентриситетов и наклонностей, а Пуассон путем глубокого анализа показал, что этот вывод продолжает существовать, если распространить приближения на квадраты и произведения масс планет. Таким образом, изменения, наблюдаемые в средних движениях Юпитера и Сатурна, не зависят от их вековых неравенств.

Постоянство средних движений планет и больших осей их орбит представляет одно из самых замечательных явлений в мироздании. Все другие элементы планетных эллипсов изменчивы. Эти эллипсы незаметно приближаются или отдаляются от круговой формы, их наклон к неподвижной плоскости и к эклиптике увеличивается или уменьшается, их перигелии и узлы находятся в движении. Все эти изменения, вызванные взаимным действием планет, осуществляются так медленно, что в течение многих веков они почти пропорциональны времени. Наблюдения уже позволили их обнаружить: мы видели в первой книге, что перигелий земной орбиты в настоящее время имеет прямое годичное движение, равное $36^{cc}$ [12″], и что вековое уменьшение наклонности этой орбиты к экватору равно $148^{cc}$ [48″]. Эйлер первый объяснил причину этого уменьшения, вызываемого ныне всеми планетами, относительным

расположением плоскостей их орбит. Изменения земной орбиты привели к совпадению солнечного перигея с весенним равноденствием в эпоху, к которой можно возвратиться путем анализа и которая, по моим расчетам, была за 4089 лет до нашей эры. Примечательно, что эта астрономическая эпоха приблизительно совпадает с той, к которой большинство хронологов относит сотворение мира.

Старинные наблюдения недостаточно точны, а современные слишком близки друг к другу, чтобы с точностью установить величину больших изменений в орбитах планет. Тем не менее их совокупность достаточна, чтобы доказать существование этих изменений и показать, что их ход именно таков, какой вытекает из закона всемирного тяготения. Поэтому посредством теории можно было бы опередить наблюдения и определить истинные значения вековых неравенств планет, если бы знать их массы; одним из наиболее надежных способов узнать их является наблюдение развития этих неравенств во времени. Тогда можно будет мысленно вернуться к последовательным изменениям, которые испытала планетная система; можно будет предвидеть те изменения, которые в будущие века предстанут перед наблюдателями, и геометр в своих формулах одним взглядом охватит все прошлые и будущие состояния этой системы.

Здесь возникает много интересных вопросов. Всегда ли были и будут планетные эллипсы близкими к окружностям? Не были ли некоторые из планет вначале кометами, орбиты которых потом постепенно приблизились к круговым под влиянием притяжения других планет? Не будет ли уменьшение наклонности эклиптики продолжаться до совпадения ее с экватором, что установило бы постоянное равенство дня и ночи на всей Земле? На эти вопросы анализ отвечает удовлетворительным образом. Мне удалось доказать, что каковы бы ни были массы планет, только из-за того, что все они движутся в одном направлении и по мало эксцентричным орбитам с малым наклоном по отношению друг к другу, их вековые неравенства должны быть периодическими и заключенными в узкие пределы, так что планетная система только колеблется около среднего состояния, от которого она отклоняется лишь на очень малую величину. Таким образом, эллипсы планет всегда были и будут почти круговыми, откуда следует, что ни одна планета не была вначале кометой, по крайней мере, если принимать во внимание лишь взаимодействие тел планетной системы. Эклиптика никогда не совпадет с экватором, и полный размах изменений ее наклонности не может превысить трех градусов.

Движения планетных орбит и звезд могут помешать астрономам, если они захотят сравнивать точные наблюдения, разделенные большими промежутками времени. Это затруднение уже дает о себе знать. Поэтому было бы интересно найти неизменную плоскость, или такую, которая сохраняла бы положение, параллельное самой себе. В конце предыдущей книги мы изложили простой способ для определения подобной плоскости при движении системы тел, подверженных только их взаимным воздействиям. Этот способ в применении к солнечной системе дает следующее правило:

«Если в некоторый момент на плоскости, проходящей через центр Солнца, провести из этого центра прямые к восходящим узлам планетных орбит на этой плоскости; если на этих прямых отложить от центра Солнца отрезки, представляющие тангенсы углов наклона орбиты к этой плоскости; если затем предположить, что на концах отложенных отрезков находятся массы, пропорциональные массам планет, умноженным, соответственно, на квадратные корни из параметров их орбит и на косинусы их наклонностей, и, наконец, определить центр тяжести этой новой системы масс, то прямая, проведенная из этой точки в центр Солнца, представит тангенс угла наклона неизменной плоскости над данной плоскостью, и продолжение прямой за эту точку, до пересечения с небом, отметит положение ее восходящего узла».

Каковы бы ни были изменения, внесенные чередой веков в планетные орбиты и в плоскость, к которой их относят, определенная нами по этим правилам плоскость сохранит всегда параллельное положение. Правда, ее положение зависит от масс планет. Но скоро они будут достаточно хорошо известны, чтобы с точностью его установить. Принимая для этих масс значения, которые мы приведем в следующей главе, находим, что долгота восходящего узла неизменной плоскости в начале XIX в. была равна 114.$^g$7008 [103.°2307], а ее наклон к эклиптике в ту же эпоху составляет 1.$^g$7565 [1.°5808].

Мы не учитываем здесь кометы, которые все же должны оказывать влияние на положение этой неизменной плоскости, поскольку они входят в солнечную систему. Было бы легко принять их во внимание по тому же правилу, если бы их массы и элементы их орбит были известны. Но из-за недостатка наших знаний в этой области мы предполагаем их массы достаточно малыми, чтобы их действие на планетную систему было незаметно. Это представляется очень вероятным, так как теория взаимного притяжения планет оказывается достаточной, чтобы представить все неравенства, наблюдаемые в их движениях. Впрочем, если влияние комет сказывается с течением времени, оно должно изменять главным образом положение плоскости, которое мы считаем неизменным. Даже с этой, новой точки зрения рассмотрение этой плоскости будет полезным, если удастся узнать ее изменения, что представит большие трудности.

Теория вековых и периодических неравенств движения планет, основанная на теории всемирного тяготения, была подтверждена ее согласием со всеми древними и современными наблюдениями. Эти неравенства особенно заметны в теории Юпитера и Сатурна. Они представляются в таком сложном виде и продолжительность их периодов столь значительна, что понадобилось бы несколько веков, чтобы из одних наблюдений определить их законы; и в этом теория обогнала наблюдения.

Узнав о неизменности средних планетных движений, я заподозрил, что наблюдаемые изменения в движениях Юпитера и Сатурна происходят от действия комет. Лаланд заметил в движении Сатурна неправильности, казавшиеся независимыми от действия Юпитера. Он нашел, что возвращения Сатурна к точке весеннего равноденствия в прошлом веке

происходили раньше, чем возвращения к осеннему равноденствию, хотя положения Юпитера и Сатурна как между собой, так и относительно их перигелиев были почти одинаковыми. Ламберт наблюдал еще, что среднее движение Сатурна, которое, если исходить из сравнения современных наблюдений с древними, казалось, замедляется от века к веку, напротив, ускорялось, если сравнивать между собой одни современные наблюдения, тогда как среднее движение Юпитера представляло обратное явление. Все это наводило на мысль, что изменения в движениях Юпитера и Сатурна происходили по причинам, не зависящим от действия этих планет. Но при дальнейшем размышлении ход наблюденных изменений в средних движениях этих двух планет показался мне так хорошо согласующимся с тем, который должен был следовать из их взаимного притяжения, что без дальнейших колебаний я отбросил гипотезу постороннего влияния.

Замечательный результат взаимного влияния планет заключается в том, что если принять во внимание лишь неравенства, имеющие очень длинные периоды, сумма отношений массы каждой планеты к большой оси ее орбиты, рассматриваемой как изменяющийся эллипс, всегда почти постоянна. Поскольку квадраты средних движений обратно пропорциональны кубам этих осей, из этого следует, что если движение Сатурна замедляется действием Юпитера, то движение Юпитера должно ускоряться влиянием Сатурна; это согласуется с наблюдениями. Я увидел также, что и отношение этих изменений совпадает с тем, что получалось из наблюдений. Если, подобно Галлею, для первого века, считая с 1700 г., отставание Сатурна положить равным $256.^{cc}94$ [$83.''25$], соответствующее ускорение Юпитера было бы $104,^{cc}91$ [$33.''99$], а Галлей из наблюдений получил $106.^{cc}02$ [$34.''35$]. Поэтому было очень вероятно, что изменения, наблюденные в средних движениях Юпитера и Сатурна, создаются их взаимным притяжением, а так как достоверно известно, что это действие не может создать никакого постоянно возрастающего неравенства, так же как и периодического, но с периодом, независимым от взаимного расположения этих планет, и что оно создает только неравенства, зависящие от этого взаимного расположения, то было естественно думать, что в их теории существует значительное неравенство такого рода с очень долгим периодом, порождающее эти изменения.

Такого рода неравенства, хотя и очень малые и почти незаметные в дифференциальных уравнениях, значительно увеличиваются при интегрировании и могут достичь большой величины в выражении, представляющем долготу планеты. Мне было легко обнаружить подобные неравенства в дифференциальных уравнениях движения Юпитера и Сатурна. Эти движения почти соизмеримы, и пятикратное движение Сатурна почти равно удвоенному движению Юпитера.

Отсюда я заключил, что члены, имеющие аргументом пятикратную среднюю долготу Сатурна без удвоенной средней долготы Юпитера, могут стать очень заметными при интегрировании, хотя они умножаются на кубы и произведения трех измерений эксцентриситетов и наклонностей орбит. В соответствии с этим я смотрел на эти члены как на очень воз-

можную причину вариаций, наблюдаемых в средних движениях этих планет. Большая вероятность этой причины и важность вопроса побудили меня предпринять утомительные вычисления, необходимые для подтверждения моих предположений. Результат вычислений их полностью подтвердил и показал, что, во-первых, в теории Сатурна существует большое неравенство с максимумом в 8895.$^{cc}$7 [2882.″2] и с периодом в 929 лет, которое должно прибавляться к среднему движению этой планеты, и что, во-вторых, движение Юпитера подобным же образом подчинено соответствующему неравенству обратного знака почти с таким же периодом, доходящему до 3662.$^{cc}$4 [1186.″6]. Величины коэффициентов этих неравенств и их периоды не всегда одинаковы. Они участвуют в вековых вариациях элементов орбит, от которых они зависят. Я с особой тщательностью определил эти коэффициенты и их вековые уменьшения.

Этим двум большим неравенствам, ранее не известным, следует приписать видимое замедление Сатурна и видимое ускорение Юпитера. Явления эти достигли максимума около 1560 г. С этой эпохи средние видимые движения этих двух планет стали приближаться к истинным и были им равны в 1790 г. Вот почему Галлей, сравнив современные наблюдения с древними, нашел среднее движение Сатурна более медленным, а Юпитера более быстрым, чем при сравнении между собой современных наблюдений, а Ламберт, наоборот, исходя из современных наблюдений, получил ускорение в движении Сатурна и замедление Юпитера. Замечательно, что величина этих изменений, выведенная только из наблюдений Галлея и Ламберта, очень близка к той, которая получается из двух больших неравенств, о которых я говорил. Если бы астрономия возродилась на четыре с половиной века позже, наблюдения дали бы противоположный результат. Таким образом, средние движения, приписываемые астрономами какого-либо народа Юпитеру и Сатурну, могут указать нам эпоху, когда у этого народа возникла астрономия. Таким путем находим, что индийцы определили среднее движение этих планет в той части периода описанных неравенств, в которой видимое среднее движение Сатурна было самым медленным, а Юпитера самым быстрым. Две из таких эпох, из которых одна относится к 3102 г. до христианской эры, а другая — к 1491 г., удовлетворяют этим условиям.

Почти соизмеримое отношение движений Юпитера и Сатурна порождает еще другие, очень заметные неравенства. Самое значительное из них проявляется в движении Сатурна. Оно смешалось бы с уравнением центра, если бы пятикратное движение этой планеты не оказалось в точности равным двукратному движению Юпитера. Главным образом в прошлом веке оно привело к более быстрому возвращению Сатурна к весеннему равноденствию, чем к осеннему. Вообще, когда я обнаружил эти неравенства и с большей точностью, чем это делалось раньше, определил те, которые уже вычислялись, я увидел, что все явления, наблюдаемые в движениях этих двух планет, сами собой укладываются в теорию. Прежде казалось, что они составляют исключения из закона

всемирного тяготения, но теперь они стали одним из самых убедительных его доказательств. Такова была судьба этого блестящего открытия Ньютона, что каждая возникающая трудность оказывалась для него источником нового триумфа, что является наиболее верным признаком истинной системы природы. Формулы, к которым я пришел, чтобы представить движение Юпитера и Сатурна, удовлетворяют с замечательной точностью противостояниям этих двух планет, наблюденным самыми искусными астрономами с помощью лучших меридианных инструментов и самых больших квадрантов. Ошибка никогда не достигала $40^{cc}$ [13″], а ведь не прошло и 20 лет с той поры, когда ошибки лучших таблиц превышали иногда $4000^{cc}$ [1300″]. С точностью самих наблюдений эти формулы представляют еще наблюдения Флемстида и арабов, а также наблюдения, упоминаемые Птолемеем. Высокая точность, с которой две самые большие планеты нашей системы подчинялись с самых отдаленных времен законам своего взаимного притяжения, доказывает устойчивость этой системы, поскольку Сатурн, притяжение которого Солнцем приблизительно в 100 раз меньше, чем притяжение тем же светилом Земли, со времен Гиппарха и до наших дней не испытал никакого заметного действия со стороны посторонних причин.[30]

Я не могу не сравнить здесь реальные эффекты отношения, существующего между средними движениями Юпитера и Сатурна, с теми, которые им приписывала астрономия. В силу этого отношения взаимные соединения этих двух планет происходят с интервалом около 20 лет. Но точка неба, где это случается, отступает приблизительно на одну треть зодиака, так что, если соединение случается в первой точке Овна, через 20 лет оно будет в знаке Стрельца, еще через 20 лет перейдет в знак Льва, а потом опять в знак Овна, но уже на расстоянии $10^{g}$ [9°] от своего первоначального положения. Соединения будут происходить в этих трех знаках зодиака около 200 лет. Затем точка соединений подобным же образом за два следующих столетия пройдет знаки Тельца, Козерога и Девы, затратит еще 200 лет, чтобы пройти знаки Близнецов, Водолея и Весов и наконец в два следующих века пройдет знаки Рака, Рыб и Скорпиона, чтобы снова начать движение со знака Овна. Так образуется большой год, каждый сезон которого продолжается два века. Этим сезонам приписывали разную температуру, так же как и знакам, которые им соответствуют. Совокупность этих трех знаков называлась *тригоном*. Первый был тригоном огня, второй — земли, третий — воздуха и четвертый — воды. Можно себе представить, что астрология широко пользовалась этими тригонами, которые сам Кеплер с большими подробностями разъяснял во многих работах. Но примечательно, что здравая астрономия, заставив исчезнуть эти воображаемые влияния соотношений между средними движениями Юпитера и Сатурна, нашла в них источник больших возмущений планетной системы.

Планета Уран, хотя открыта недавно, уже обнаруживает неопровержимые признаки возмущений, испытываемых ею под воздействием Юпитера и Сатурна. Законы эллиптического движения не удовлетворяют в точности ее наблюденным положениям, и чтобы представить последние,

надо учитывать эти возмущения. Их теория по замечательному совпадению помещает эту планету в 1769, 1756, 1690 гг. в те точки неба, в которых Лемонье, Майер и Флемстид определили положение трех слабых звезд, не обнаруживаемых в наши дни, что не оставляет сомнения в их идентичности с Ураном.

Недавно открытые малые планеты подвержены действию очень больших неравенств, которые прольют новый свет на теорию небесных притяжений и приведут к ее усовершенствованию. Но путем наблюдений еще не было возможности их выявить. Нет еще и трех веков, как Коперник, первый, ввел в астрономические таблицы движения планет вокруг Солнца. Около века спустя Кеплер ввел в них законы эллиптического движения, найденные им по наблюдениям Тихо Браге и приведшие Ньютона к открытию всемирного тяготения. После этих трех эпох, которые будут навеки памятными в истории науки, развитие анализа бесконечно малых позволило нам применить его к вычислению многочисленных неравенств в движениях планет, возникающих от их взаимного притяжения. Благодаря этому таблицы достигли неожиданной точности: ранее их ошибки доходили до нескольких минут, теперь же они уменьшились до немногих секунд; и, вероятно, их отклонения часто вызваны неизбежными погрешностями наблюдений.

## Глава III

### О МАССАХ ПЛАНЕТ И О СИЛЕ ТЯЖЕСТИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Так как отношение массы планеты к массе Солнца является главным элементом теории возмущений, которые эта планета производит, сравнение этой теории с большим числом очень точных наблюдений должно позволить нам узнать это отношение тем точнее, чем больше возмущения, причиной которых она является. Именно таким способом были определены массы Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. Массы Юпитера и Сатурна, а также планет, имеющих спутников, могут быть определены еще следующим образом.

Из изложенных в предыдущей книге теорем о центробежной силе следует, что сила притяжения спутника к своей планете относится к притяжению Земли Солнцем, как радиус орбиты спутника, разделенный на квадрат звездного времени обращения, относится к среднему расстоянию Земли от Солнца, разделенному на квадрат звездного года. Чтобы привести эти силы тяготения к одному и тому же расстоянию от тел, которые их порождают, надо умножить их, соответственно, на квадраты радиусов орбит, описываемых под действием этих сил; и так как на одинаковых расстояниях массы пропорциональны притяжениям, масса планеты относится к массе Солнца как куб среднего радиуса орбиты спутника, разделенный на квадрат времени его звездного обращения, относится к кубу среднего расстояния Земли от Солнца, разделенному на квадрат звездного года. Этот результат предполагает, что можно пренебречь массой спут-

ника относительно его планеты и массой планеты относительно массы Солнца; это можно сделать без заметной ошибки. Результат будет точнее, если вместо массы планеты подставить сумму масс планеты и спутника, а вместо массы Солнца — сумму масс Солнца и планеты, потому что сила, удерживающая тело на своей орбите вокруг притягивающего его тела, зависит от суммы обеих масс.

Применим полученный вывод к Юпитеру. Средний радиус орбиты четвертого спутника, который мы приводили во второй книге, если бы наблюдать его с расстояния, равного среднему расстоянию Земли от Солнца, был бы виден под углом в 7964.$^{cc}$75 [2580.″58]. Радиус окружности содержит 636 619.$^{cc}$8 [206 264.″8]. Следовательно, отношение средних радиусов орбиты четвертого спутника и Земли равно отношению этих двух чисел. Продолжительность звездного обращения четвертого спутника равна 16.6890 суток, а звездный год равен 365.2564 суток. Исходя из этих данных, находим, что масса Юпитера, если за единицу взять массу Солнца, равна 1/1067.09. Для большей точности надо уменьшить делитель этой дроби на одну единицу. Тогда получаем 1/1066.09.

Таким же образом я нашел, что масса Сатурна равна 1/3359.4, а масса Урана составляет 1/19504 массы Солнца.

Возмущения, испытываемые этими тремя большими планетами под влиянием их взаимного притяжения, дают способ с большой точностью получить значения их масс. Бувар, сравнив с моими формулами, приведенными в «Небесной механике», большое число особенно тщательно проанализированных наблюдений, построил новые, очень точные таблицы Юпитера, Сатурна и Урана. Для этой важной работы он составил условные уравнения, оставив в них в качестве неизвестных массы этих планет. Решив эти уравнения, он получил, соответственно, следующие величины масс: 1/1070.5; 1/3512; 1/17918.

Если учесть трудность измерения элонгаций спутников Сатурна и Урана и незнание нами эллиптичности орбит этих спутников, достойна удивления та малая разница, которая получилась между величинами, вычисленными исходя из этих элонгаций, и выведенными по возмущениям. Эти последние величины включают для каждой планеты как ее массу, так и массу ее спутников, к тому же для Сатурна надо прибавить еще массу кольца. Но все наводит на мысль, что масса планеты сильно превышает массы окружающих ее тел. Во всяком случае это несомненно для Юпитера и Земли. Применяя мой метод анализа вероятностей к условным уравнениям г-на Бувара, было найдено, что, с вероятностью в миллион против одного, значение массы Юпитера, которое получил Бувар, ошибочно не более чем на $\pm 1/100$ своей величины. Для массы Сатурна эта вероятность равна 11 000 против единицы. Так как возмущения, производимые Ураном в движении Сатурна, незначительны, придется ждать большего числа наблюдений, чтобы получить его массу с той же вероятностью. Но при существующем состоянии наблюдений можно ставить 2500 против одного, что приведенная выше величина ошибочна не больше чем на свою четвертую часть.

Возмущения, испытываемые Землей из-за притяжения Венерой и Марсом, достаточно заметны, чтобы определить массы этих двух планет. Буркхардт, составивший великолепные солнечные таблицы, основанные на четырех тысячах наблюдений, получил массы этих планет, равными, соответственно, 1/405871 и 1/2546320.

Описанным ниже способом можно получить и массу Земли. Если за единицу взять ее среднее расстояние от Солнца, дуга, описываемая ею за секунду времени, будет равна отношению окружности к радиусу, деленному на число секунд в звездном году, или на 36 525 636.1c [31 558 149.$^{s}$6]. Разделив квадрат этой дуги на диаметр, получим для ее синуса-верзуса $1479\,565/10^{20}$. Это та величина, на которую Земля падает за одну секунду на Солнце в силу своего относительного движения вокруг этого светила. В предыдущей главе мы видели, что на земной параллели, квадрат синуса широты которой равен 1/3, в результате притяжения Земли тела падают за одну секунду на 3.66477 м. Чтобы привести это притяжение к среднему расстоянию Земли от Солнца, его надо умножить на квадрат синуса солнечного параллакса и полученное произведение разделить на число метров, заключенных в этом расстоянии. Земной радиус на рассматриваемой нами параллели равен 6 369 809 м. Поэтому, разделив это число на синус солнечного параллакса, полагаемого равным 26.$^{cc}$54 [8.″60], мы получим средний радиус земной орбиты, выраженный в метрах. Отсюда следует, что действие притяжения Земли на среднем расстоянии этой планеты от Солнца равно произведению дроби 3.66477/6369809 на куб синуса 26.$^{cc}$54 [8.″60], т. е. $4.16856/10^{20}$. Вычтя эту дробь из $1479565/10^{20}$, получим, что притяжение Солнца на таком же расстоянии равно $1\,479\,560.8/10^{20}$. Следовательно, отношение масс Солнца и Земли равно отношению чисел 1 479 560.8 и 4.16856, откуда следует, что масса Земли равна 1/354936 массы Солнца.

Если параллакс Солнца немного отличается от предположенного нами, значение массы Земли должно измениться как куб этого параллакса по сравнению с кубом параллакса 26.$^{cc}$54 [8.″60].

Масса Меркурия была определена по его объему в предположении, что плотности этой планеты и Земли обратны их расстояниям до Солнца. Хотя эта гипотеза весьма ненадежна, но она довольно хорошо удовлетворяет относительным плотностям Земли, Юпитера и Сатурна. Со временем, когда будут лучше известны вековые изменения движений небесных тел, все эти величины надо будет уточнить.

Массы планет при массе Солнца, принятой за единицу:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Меркурий | 1/2 025 810 | Юпитер | 1/1070.5 |
| Венера | 1/405 871 | Сатурн | 1/3512 |
| Земля | 1/354 936 | Уран | 1/17 918 |
| Марс | 1/2 546 320 | | |

Плотности тел пропорциональны массам, деленным на объемы, а когда массы имеют приблизительно сферическую форму, их объемы относятся как кубы их радиусов. Поэтому плотности относятся как массы, деленные на кубы радиусов. Но для большей точности за радиус планеты надо

брать радиус, соответствующий параллели, у которой квадрат синуса широты равен 1/3.

В первой книге мы видели, что полудиаметр Солнца виден со среднего расстояния Солнца от Земли под углом в $2966^{cc}$ [961″]. На таком же расстоянии земной радиус был бы виден под углом в $26.^{cc}54$ [8.″60]. Отсюда легко заключить, что если за единицу взять среднюю плотность солнечного шара, средняя плотность Земли оказывается равной 3.9326. Эта величина независима от солнечного параллакса, так как и объем и масса Земли возрастают как кубы этого параллакса.

Экваториальный полудиаметр Юпитера, видимый на среднем расстоянии от Солнца, по точным измерениям Араго равен $56.^{cc}702$ [18.″371]. Полуось, проходящая через полюса, равна $53.^{cc}497$ [17.″333]. Поэтому радиус сфероида Юпитера, соответствующий параллели, квадрат синуса широты которой равен 1/3, был бы виден на таком же расстоянии под углом в $55.^{cc}967$ [18.″133], а на среднем расстоянии от Земли до Солнца — под углом в $291.^{cc}185$ [94.″344]. Отсюда легко заключить, что плотность Юпитера равна 0.99239.

Таким же способом можно определить плотности других планет, но ошибки измерений их видимых диаметров и оценки их масс еще создают большую неуверенность в результатах вычислений. Если предположить видимый диаметр Сатурна на среднем расстоянии от Солнца равным $50^{cc}$ [16″], получим его плотность, равной 0.55, опять-таки принимая за единицу плотность Солнца.

Сравнивая относительные плотности Земли, Юпитера и Сатурна, видим, что они меньше у планет, более отдаленных от Солнца. Кеплер пришел к тому же выводу, руководствуясь идеями порядка и гармонии, и предположил, что плотности планет обратно пропорциональны корням квадратным из их расстояний. Но по тем же соображениям он считал, что Солнце — наиболее плотное из всех небесных светил, что, конечно, не так. Планета Уран, плотность которой кажется превосходящей плотность Сатурна, отклоняется от приведенного правила, но неуверенность в измерениях ее видимого диаметра и наибольших элонгаций ее спутников не позволяет дать окончательный ответ на этот вопрос.

Чтобы получить величину силы тяжести на поверхности Солнца и планет, примем во внимание, что если бы Юпитер и Земля были в точности сферическими и не имели вращательного движения, силы тяжести на их экваторах были бы пропорциональны их массам, разделенным на квадраты их диаметров. На расстоянии, равном среднему расстоянию Земли от Солнца, полудиаметр Юпитера был бы виден под углом в $291.^{cc}185$ [94.″344], а полудиаметр земного экватора — под углом в $26.^{cc}54$ [8.″60]. Если за единицу взять вес тела на этом экваторе, вес этого же тела, перенесенного на экватор Юпитера, был бы 2.716. Но его нужно уменьшить приблизительно на 1/9, чтобы учесть центробежные силы, вызванные вращением этих планет. То же самое тело на экваторе Солнца весило бы 27.9. За первую секунду своего падения тела там пролетают 102 м.

Огромные расстояния, отделяющие нас от этих больших тел, казалось, должны были навсегда скрыть от человеческого познания действие тя-

жести на их поверхности. Но последовательность истин приводит нас к результатам, которые представлялись недоступными, когда начало, от которого они зависят, было неизвестно. Благодаря открытию закона всемирного тяготения, стало возможным измерить силу тяжести на поверхности Солнца и планет.[31]

## Глава IV

### О ВОЗМУЩЕНИЯХ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ КОМЕТ

Влияние планет создает в движениях комет неравенства, заметные главным образом по промежуткам между их возвращениями к перигелию. Галлей, заметив, что элементы орбит комет, наблюденных в 1531, 1607 и 1682 гг., были почти одинаковыми, заключил из этого, что они принадлежали одной и той же комете, которая за промежуток в 151 год сделала два обращения. На самом деле период ее обращения был на 13 месяцев продолжительнее в интервале с 1531 по 1607 г., чем с 1607 по 1682 г. Но этот великий астроном не без основания подумал, что притяжение планет, и в особенности Юпитера и Сатурна, могло вызвать эту разницу. В соответствии с несколько неопределенной оценкой этого действия в течение следующего периода обращения он пришел к выводу, что оно должно будет замедлить следующее возвращение кометы, и установил его дату на конец 1758 или начало 1759 г. Это сообщение было очень важным само по себе и слишком тесно связано с теорией всемирного тяготения, которой геометры середины прошлого века усиленно занимались с целью расширить область ее приложения. Поэтому оно не могло не возбудить любопытство всех интересующихся успехами наук и, в особенности теорией, которая уже согласовывалась с большим числом явлений. Неуверенные во времени появления кометы астрономы искали ее начиная с 1757 г., и Клеро, одним из первых разрешивший задачу трех тел, приложил свое решение к поискам тех изменений, которые движение кометы испытывало под воздействием Юпитера и Сатурна. 14 ноября 1758 г. он доложил Академии наук, что время возвращения кометы к своему перигелию будет в этом обращении приблизительно на 618 суток длиннее, чем было в предыдущем, и поэтому комета пройдет перигелий около середины апреля 1759 г. В то же время он отметил, что некоторые небольшие величины, не принятые им во внимание в его приближениях, могут на месяц передвинуть вперед или назад эту дату. Он отметил еще, что «тело, проходящее по таким отдаленным районам и исчезающее из наших глаз на столь длинные промежутки времени, могло быть подвержено действию совершенно незнакомых нам сил, таких как влияние других комет или даже *какой-либо планеты, всегда настолько удаленной от Солнца, что она никогда не сможет быть обнаружена»*. Этот геометр получил удовлетворение, увидев свое предсказание сбывшимся: комета прошла перигелий 12 марта 1759 г. — в пределах допускавшейся им ошибки в вычислениях. После новой ревизии своих расчетов, Клеро определил дату этого прохождения на 4 апреля и передвинул бы ее на

24 марта, т. е. на дату, отстоящую всего на 12 суток от фактического момента наблюдения, если бы использовал значение массы Сатурна, приведенное в предыдущей главе. Эта разница покажется очень маленькой, если принять во внимание большое число пренебреженных им величин и возможное влияние планеты Уран, о существовании которой во времена Клеро было неизвестно.

Заметим, к чести прогресса человеческого разума, что на эту комету, которая в прошлом веке возбуждала живейший интерес среди астрономов и геометров, смотрели совсем иначе четырьмя ее обращениями раньше, в 1456 г. Длинный хвост, тянувшийся за ней, наводил ужас в Европе, уже подавленной быстрыми успехами турок, ниспровергнувших Византию, и папа Каликст повелел совершать публичные моления, в которых заклинали комету и турок. В это невежественное время люди были далеки от мысли, что природа всегда послушна неизменным законам. В зависимости от того, регулярно ли следовали одни за другими явления или без видимого порядка, их считали зависящими от конечных причин или от случая. А когда явления были необыкновенными и казались противоречащими естественному порядку вещей, их рассматривали как знак небесного гнева.

Страхи, вызываемые некогда появлением комет, сменились боязнью, что какая-нибудь из множества комет, пересекающих во всех направлениях планетную систему, разрушит Землю. Они с такой скоростью проходят мимо нас, что влияния их притяжения не следует бояться. Только столкнувшись с Землей, они могут причинить гибельные разрушения. Но это столкновение, хотя и возможно, очень маловероятно в интервале одного века. Для столкновения двух тел, столь малых в сравнении с необъятным пространством, в котором они движутся, нужно такое необыкновенное стечение обстоятельств, что не может возникнуть разумного опасения в этом отношении. Однако малая вероятность такой встречи, накапливаясь в течение многих лет, может сделаться очень большой. Легко представить себе действие такого удара о Землю. Ось вращения и вращательное движение Земли изменятся. Моря покинут свои прежние места и устремятся к новому экватору. Бо́льшая часть людей и животных потонут в этом всемирном потопе или погибнут от сильнейшего сотрясения, испытанного земным шаром. Какие-то виды живых существ погибнут целиком. Все сооружения, созданные деятельностью человека, разрушатся. Вот каковы бедствия, которые произвел бы удар кометы, если бы ее масса была сравнима с массой Земли. Мы видим из этого, почему Океан покрывал высокие горы, на которых он оставил неоспоримые следы своего присутствия. Мы видим, почему животные и растения юга могли существовать в северных странах, где находят их останки и следы. Наконец, становится объяснимым недолгий срок существования культурного мира, несомненные памятники которого не старше пяти тысячелетий. Человеческий род, сокращенный до небольшого числа индивидуумов и в самом жалком состоянии занятый в течение очень продолжительного времени единственной заботой — сохранением своего существования, должен был полностью потерять память о науках и искусствах, и когда успехи циви-

лизации вновь дали почувствовать в них нужду, пришлось начинать все сначала, как если бы люди заново заселили Землю.

Какова бы ни была причина, приписанная некоторыми философами этим явлениям, я повторяю, мы должны успокоиться насчет повторения такого страшного события во время короткого промежутка жизни, тем более, что, по-видимому, массы комет исключительно малы, и поэтому их удар может произвести только местные разрушения. Но человек так склонен к боязни, что мы видели в 1773 г., как после простого извещения о мемуаре Лаланда, где он перечислил те из наблюденных комет, которые могут ближе всего подойти к Земле, в Париже распространился сильнейший страх, передавшийся затем всей Франции. Вот в какой мере верно, что заблуждения, суеверия, напрасные страхи и все зло, являющееся следствием незнания, быстро возобновились бы, если бы потух светоч науки.

Наблюдения кометы, появившейся в 1770 г., привели астрономов к необыкновенному результату. После безуспешных попыток подчинить эти наблюдения законам параболического движения, до сих пор почти точно представлявшего движение комет, астрономы наконец поняли, что во время своего появления она описывала эллипс, в котором продолжительность ее обращения не превышала 6 лет. Лексель, впервые сделавший этот интересный вывод, удовлетворил таким образом всем наблюдениям этой кометы. Но такая короткая продолжительность могла быть принята только после неопровержимых доказательств, основанных на новых и углубленных исследованиях наблюдений кометы и положений звезд, к которым ее относили. Академия наук предложила премию за эти исследования, которую получил Буркхардт. Его исследования привели почти точно к результатам Лекселя, относительно которых теперь не должно оставаться никаких сомнений. Комета, имеющая такое быстрое обращение, должна была бы часто появляться. Однако она не наблюдалась ранее 1770 г., да и после него ее больше не видели. Чтобы объяснить это, Лексель заметил, что в 1767 и 1779 гг. эта комета очень близко приближалась к Юпитеру, сильное притяжение которого уменьшило в 1767 г. перигельное расстояние ее орбиты настолько, что она стала видима в 1770 г., тогда как раньше не была видна. Затем, в 1779 г., это расстояние вновь увеличилось, и комета навсегда сделалась невидимой. Но необходимо было доказать возможность этих двух воздействий притяжения Юпитера и показать, что элементы эллипса, описанного кометой, могли им удовлетворить. Я это сделал, подвергнув этот предмет анализу, благодаря которому предыдущее объяснение стало правдоподобным.

Из всех наблюденных комет эта больше всего приближалась к Земле, которая должна была бы испытать заметное воздействие, если бы масса этой кометы была сравнима с массой земного шара. Если предположить, что эти две массы одинаковы, действие кометы должно было бы увеличить продолжительность звездного года на $11612^c$ [$10033^s$]. Но, исходя из многочисленных сравнений наблюдений, сделанных Деламбром и Буркхардтом при составлении солнечных таблиц, мы вполне уверены, что с 1770 г. звездный год не прибавился даже на $3^c$ [$2.6^s$]. Поэтому масса

кометы не превышает 1/5000 массы Земли и, если принять во внимание, что в 1767 и 1779 гг. это светило пересекло систему спутников Юпитера, не вызвав в ней ни малейших нарушений, можно заключить, что она даже еще меньше. Малость масс комет вообще подтверждается незаметностью их влияния на движение тел планетной системы. Эти движения представляются одним только действием тел этой системы с такой точностью, что небольшие отклонения наших лучших таблиц можно приписать одним лишь погрешностям приближений и ошибкам наблюдений. Но только очень точные наблюдения, выполняемые в течение нескольких веков и сравниваемые с теорией, могут осветить этот важный вопрос системы мира.

## Глава V

## О ВОЗМУЩЕНИЯХ ДВИЖЕНИЯ ЛУНЫ

Луна одновременно притягивается и Солнцем и Землей. Ее движение вокруг Земли нарушается только разностью действия Солнца на эти два тела. Если бы Солнце находилось на бесконечно большом расстоянии, оно действовало бы на них одинаково по параллельным направлениям. Их относительное движение не было бы искажено этим действием, общим для них обоих. Но расстояние до Солнца, хотя и очень большое по сравнению с расстоянием до Луны, не может считаться бесконечным. Луна попеременно находится то ближе, то дальше от Солнца, чем Земля, и прямая, соединяющая ее центр с центром Солнца, составляет более или менее острые углы с радиусом-вектором Земли. Поэтому на Землю и на Луну Солнце действует неодинаково и в разных направлениях. От этого различия его действий в лунном движении должны появляться неравенства, зависящие от взаимного положения Солнца и Луны. В исследованиях этих неравенств заключается знаменитая задача трех тел, точное решение которой превосходит возможности математического анализа. Однако она может быть решена методом приближений благодаря близости Луны по сравнению с ее расстоянием до Солнца и малости ее массы по сравнению с массой Земли. Тем не менее необходим очень тонкий анализ, чтобы выделить все члены, имеющие заметное влияние. Наиболее важным пунктом этого анализа является рассмотрение этих членов, если поставлена задача улучшения лунных таблиц, что должно быть главной целью работы. Можно легко представить себе множество различных способов составления уравнений для решения проблемы трех тел. Но главная трудность заключается в том, чтобы в дифференциальных уравнениях распознать и точно определить те члены, которые, будучи сами по себе очень маленькими, достигают заметной величины при последовательных интегрированиях; это требует наивыгоднейшего выбора координат, тщательного рассмотрения природы интегралов, хорошо проведенных приближений и тщательных вычислений, проверенных много раз. Я поставил своей задачей выполнить все эти условия в теории движения Луны, приведенной в моей «Небесной

механике», и имел удовлетворение видеть, что мои результаты совпадают с теми, которые Мейсон и Бюрг получили путем сравнения почти 5000 наблюдений Брадлея и Маскелайна; эти наблюдения придали лунным таблицам точность, которую будет трудно превзойти, и именно ей география и главным образом мореходная астрономия обязаны своим прогрессом. Здесь следует сказать, что Майер по праву считается одним из величайших астрономов, которые когда-либо существовали. Он первый придал этим таблицам ту степень точности, которая необходима для этого важного дела. Мейсон и Бюрг сохранили приданную им форму таблиц. Они исправили коэффициенты предложенных им неравенств и прибавили еще несколько других неравенств, указанных в его теории. Кроме того, изобретением повторительного круга, значительно усовершенствованного Борда, Майер придал наблюдениям на море ту же точность, какую он внес в лунные таблицы. Наконец, Буркхардт усовершенствовал лунные таблицы, придав их аргументам более простую и удобную форму и определив их коэффициенты по всей совокупности современных наблюдений. Задачей моей теории было показать, что закон всемирного тяготения является единственным источником всех неравенств лунного движения, и затем воспользоваться этим законом для улучшения таблиц и для вывода некоторых важных элементов системы мира, таких как вековые уравнения Луны, ее параллакс, параллакс Солнца и сжатие Земли. К счастью, когда я занимался этими исследованиями, Бюрг, со своей стороны, работал над улучшением лунных таблиц. Мой анализ дал ему несколько новых, очень важных уравнений, и сравнение с большим числом наблюдений, которое он сделал, подтвердило их справедливость и пролило новый свет на элементы, о которых я только что говорил.

Движения узлов и перигея Луны — вот главные следствия возмущений, испытываемых этим светилом. Первое приближение дало геометрам сперва только половину второго из этих движений. Отсюда Клеро заключил, что закон притяжения не так прост, как это до сих пор считалось, и что он состоит из двух частей, из которых первая обратно пропорциональна квадрату расстояния и одна только действует на больших расстояниях, отделяющих планеты от Солнца, а другая возрастает в большем отношении при уменьшении расстояния и становится заметной на расстоянии Луны от Земли. Это заключение оспаривалось Бюффоном. Он основывался на том, что изначальные законы природы должны быть самыми простыми, они не могут зависеть более чем от одного модуля, и их выражение не может включать больше одного члена. Это соображение, несомненно, должно привести нас к тому, чтобы не усложнять закон притяжения иначе, как лишь при крайней надобности. Но незнание нами природы этой силы не позволяет уверенно говорить о простоте ее выражения. Как бы то ни было, метафизик был на этот раз ближе к истине, чем геометр, который сам обнаружил свою ошибку и сделал важное замечание, что при дальнейших приближениях закон тяготения дает движение лунного перигея, в точности совпадающее с наблюдениями. Впоследствии это было подтверждено всеми, кто зани-

мался этим предметом. Движение, выведенное мной из моей теории, отличается от истинного не больше чем на 1/440 его часть. Что касается движения узлов, эта разность не превосходит 1/350 части.

Чтобы показать зависимость всех неравенств движения Луны от совместного действия Солнца и Земли на нашего спутника, необходим математический анализ. Однако, не прибегая к нему, можно объяснить причины возникновения годичного и векового лунных уравнений. Я тем охотнее остановлюсь на их описании, что при этом будет видно зарождение самых больших лунных неравенств, которые до сих пор оставались мало заметными, но по прошествии веков должны раскрыться наблюдателям.

Во время соединений с Солнцем Луна находится ближе к нему, чем Земля, и испытывает с его стороны более значительное влияние. При этом разность притяжения Солнцем этих двух тел стремится уменьшить притяжение Луны к Земле. Подобным же образом во время противостояний Луны и Солнца Луна более удалена от Солнца, чем Земля, и притягивается им слабее; поэтому разность солнечных притяжений опять стремится уменьшить притяжение Луны. В этих двух случаях указанное уменьшение почти одинаково и равно удвоенному произведению массы Солнца на частное от деления радиуса лунной орбиты на куб расстояния Солнца от Земли. В квадратурах действие Солнца на Луну, разложенное по направлению лунного радиуса-вектора, стремится увеличить притяжение Луны к Земле, но это увеличение равно лишь половине уменьшения притяжения, испытываемого Луной в сизигиях. Итак, в результате всех влияний Солнца на Луну в течение ее синодического обращения возникает средняя сила, направленная вдоль радиуса-вектора Луны, уменьшающая силу тяготения этого светила и равная половине произведения массы Солнца на частное от деления этого радиуса на куб расстояния от Солнца до Земли.

Чтобы получить отношение этого произведения к силе тяготения Луны, заметим, что эта сила, удерживающая ее на орбите, почти в точности равна сумме масс Земли и Луны, разделенной на квадрат расстояния между ними, и что сила, удерживающая на орбите Землю, близка к массе Солнца, деленной на квадрат его расстояния до Земли. В соответствии с теорией центростремительных сил, изложенной в третьей главе, эти две силы относятся как радиусы орбит Луны и Солнца, разделенные, соответственно, на квадраты периодов обращения этих светил. Отсюда следует, что упоминавшееся выше произведение относится к силе тяготения Луны как квадрат времени звездного обращения Луны относится к квадрату времени звездного обращения Земли. Поэтому вышеуказанное произведение почти точно равно 1/179 этого тяготения, которое средним влиянием Солнца уменьшается, таким образом, на 1/358 своей величины.

Вследствие этого уменьшения Луна удерживается на большем расстоянии от Земли, чем если бы она была предоставлена полному действию силы своего тяготения. Сектор, описанный ее радиусом-вектором вокруг Земли, не изменяется, так как производящая его сила направ-

лена по этому радиусу, но реальная скорость и угловое движение этого светила уменьшаются. Поэтому если удалить Луну настолько, что ее центробежная сила сравняется с ее силой тяготения, уменьшенной влиянием Солнца, а радиус-вектор станет описывать сектор, равный тому, который он описал бы за то же время без этого влияния, то этот радиус увеличится на 1/358, а угловое движение уменьшится на 1/179.

Эти величины изменяются обратно пропорционально кубам расстояний от Солнца до Земли. Когда Солнце находится в перигее, его влияние, увеличиваясь, растягивает лунную орбиту. Но по мере продвижения Солнца к своему апогею эта орбита сжимается. Таким образом, Луна описывает ряд эпициклоид, центры которых лежат на земной орбите и которые расширяются или сжимаются в зависимости от того, приближается ли Земля к Солнцу или удаляется от него. Отсюда в ее угловом движении возникает неравенство, похожее на уравнение центра Солнца, но с той лишь разницей, что оно замедляет это движение, когда движение Солнца увеличивается, и ускоряет, когда движение Солнца уменьшается. Таким образом, эти два уравнения имеют противоположные знаки. Угловое движение Солнца, как было показано в первой книге, обратно пропорционально квадрату его расстояния от Земли. Так как в перигее это расстояние на 1/60 меньше своей средней величины, угловое движение увеличивается на 1/30. А так как замедление лунного движения на 1/179, производимое Солнцем, пропорционально увеличению куба расстояния Солнца от Земли, это замедление увеличивается на 1/20. Поэтому возрастание этого замедления составляет 1/3580 часть лунного движения. Отсюда следует, что уравнение Солнца относится к годичному уравнению Луны, как 1/30 солнечного движения относится к 1/3580 лунного, что дает для ее годичного уравнения величину $2398^{cc}$ [777″]. Согласно наблюдениям, оно приблизительно на 1/8 меньше. Эта разница зависит от некоторых величин, не учтенных при этом первом вычислении.

Причина, подобная той, которая порождает годичное уравнение, производит и вековое уравнение Луны. Галлей первым заметил это уравнение, которое подтвердили Дэнторн и Майер путем углубленного анализа наблюдений. Эти два ученых астронома выяснили, что одно и то же среднее движение Луны не может удовлетворить и современным наблюдениям, и затмениям, наблюденным халдеями и арабами. Они попробовали представить их, прибавляя к средним долготам этого спутника величину, пропорциональную квадрату числа веков до и после 1700 г. Согласно Дэнторну, для I в. эта величина равна $30.^{cc}9$ [10.″0]. Майер в своих первых таблицах Луны принял ее равной $21.^{cc}6$ [7.″0] и довел до $27.^{cc}8$ [9.″0] в последних. Наконец, Лаланд, проведя новое исследование этого вопроса, пришел к результату Дэнторна.

Арабские наблюдения, которые главным образом были использованы, — два солнечных и одно лунное затмения, наблюденные в Каире Ибн-Юнусом около конца I в., давно извлечены из находящейся в лейденской библиотеке рукописи этого астронома. Были сомнения в реаль-

ности этих затмений, но сделанный Коссеном перевод той части этой ценной рукописи, которая заключает наблюдения, рассеял эти сомнения. Мало того, он познакомил нас еще с 25 затмениями, наблюдавшимися арабами и подтвердившими ускорение среднего движения Луны. Впрочем, чтобы его установить, достаточно сравнить современные наблюдения с наблюдениями греков и халдеев. В самом деле, с помощью большого числа наблюдений, сделанных за два последних века, Деламбр, Бувар и Бюрг определили современное значение векового движения. С точностью, которая оставляет лишь небольшую неуверенность, они нашли, что оно на 600 или 700 секунд больше, чем получаемое из сравнения современных наблюдений с древними. Следовательно, со времен халдеев лунное движение ускорилось; а так как наблюдения арабов, сделанные в отделяющем нас от халдеев интервале, подтверждают этот результат, невозможно подвергать его сомнению.

Но какова причина этого явления? Всемирное тяготение, которое позволило нам так хорошо познать многочисленные неравенства Луны, дает ли оно объяснение ее векового неравенства? Эти вопросы тем более интересно разрешить, поскольку, если это удастся, мы получим закон вековых вариаций движения Луны, так как чувствуется, что гипотеза об ускорении лунного движения, пропорциональном времени, принятая астрономами, является лишь приближением, и ее нельзя распространять на неограниченное время.

Этот вопрос очень интересовал геометров. Но их изыскания долго оставались бесплодными и не обнаружили ни в действии Солнца и планет на Луну, ни в сферичности этого спутника и Земли ничего такого, что могло бы заметно изменить ее среднее движение. Некоторые решились отвергнуть ее вековое движение. Другие для его объяснения прибегали к разным причинам, таким как влияние комет, сопротивление эфира и постепенность передачи силы тяжести. Между тем соответствие других небесных явлений с теорией всемирного тяготения настолько совершенно, что нельзя без сожаления видеть, как вековое уравнение Луны не подчиняется этой теории; это составляет единственное исключение из общего простого закона, открытие которого по величию и разнообразию объектов, которые он охватывает, делает такую честь человеческому уму. Такие размышления заставили меня решиться снова рассмотреть это явление, и после нескольких попыток я наконец пришел к открытию его причины.

*Вековое уравнение Луны вызвано действием на нее Солнца в сочетании с вековыми вариациями эксцентриситета земной орбиты.*

Чтобы составить себе правильное представление об этой причине, напомним, что элементы земной орбиты испытывают изменения под влиянием планет. Ее большая ось всегда остается неизменной, но эксцентриситет, наклон к неподвижной плоскости, положение ее узлов и перигелия непрерывно изменяются. Припомним еще, что действие Солнца на Луну на 1/179 уменьшает ее угловую скорость и что численный коэффициент этой скорости изменяется обратно пропорционально кубу расстояния Земли от Солнца. Приняв большую полуось земной орбиты за

единицу и развертывая обратную третью степень расстояния от Земли до Солнца в ряд по синусам и косинусам среднего движения Земли и его кратным, находим, что этот ряд содержит член, равный утроенной половине квадрата эксцентриситета этой орбиты. Поэтому уменьшение угловой скорости Луны содержит произведение этого члена на 1/179 этой скорости. Это произведение смешалось бы со средней угловой скоростью Луны, если бы эксцентриситет земной орбиты был постоянен. Но его изменение, хотя и очень малое, с течением времени заметно влияет на лунное движение. Ясно, что оно ускоряет движение Луны, когда эксцентриситет уменьшается; это и имело место со времен древнейших наблюдений и до наших дней. Это ускорение изменится и перейдет в замедление, когда эксцентриситет, дойдя до своего минимума, перестанет уменьшаться и начнет увеличиваться.

В промежутке между 1750 и 1860 гг. квадрат эксцентриситета земной орбиты уменьшился на 0.00000140595, а соответствующее увеличение угловой скорости Луны было равно 0.0000000117821 этой скорости. Поскольку это увеличение действовало последовательно и пропорционально времени, его влияние на движение Луны было вдвое меньше, чем если бы в течение всего века оно было одинаковым и равным своему конечному значению. Поэтому для определения этого влияния, или векового уравнения Луны к концу одного века от 1801 г., надо умножить вековое движение Луны на половину очень малого ускорения ее угловой скорости. Так как в течение века движение Луны равно 5 347 405 406$^{cc}$ [1 732 559 351″], получим это вековое уравнение равным 31.$^{cc}$5017 [10.″2066].

Пока уменьшение квадрата эксцентриситета земной орбиты можно будет считать пропорциональным времени, вековое уравнение Луны будет увеличиваться как квадрат времени. Поэтому для получения векового уравнения достаточно умножить 31.$^{cc}$5017 [10.″2066] на квадрат числа веков, протекших с момента, для которого производятся вычисления, до начала XIX в. Но я убедился, что, если обратиться к наблюдениям, член, пропорциональный третьей степени времени, при разложении в ряд векового уравнения Луны становится заметным. Для I в. этот член равен 0.$^{cc}$057214 [0.″018537]. Его следует умножить на куб числа протекших веков, начиная от 1801 г., причем для предшествующих веков это произведение отрицательно.

Среднее влияние Солнца на Луну зависит еще от наклонности лунной орбиты к эклиптике, и можно было бы думать, что из-за изменений положения эклиптики в движении Луны должны возникать вековые неравенства, подобные тому, которое производит эксцентриситет земной орбиты. Но путем математического анализа я выяснил, что лунная орбита действием Солнца непрерывно возвращается к неизменному наклону относительно земной орбиты, поэтому в силу вековых вариаций наклонности эклиптики самые малые отклонения Луны подвержены тем же изменениям, что и подобные отклонения Солнца. Это постоянство наклонности лунной орбиты подтверждается всеми древними и современными наблюдениями. Эксцентриситет лунной орбиты и ее большая

ось подобным же образом испытывают лишь неощутимые изменения из-за вариаций эксцентриситета земной орбиты.

Совсем иначе обстоит дело с вариациями движения лунных узлов и перигея. Подвергнув эти вариации анализу, я нашел, что влияние членов, зависящих от квадрата возмущающей силы и, как мы видели, удваивающих среднее движение перигея, оказывает еще большее действие на вариации этого движения. Результат этого трудного анализа дал мне вековое уравнение, втрое большее векового уравнения среднего движения Луны и вычитаемое из средней долготы ее перигея, так что среднее движение перигея замедляется, когда ускоряется среднее движение Луны. Я нашел также в движении узлов лунной орбиты по истинной эклиптике вековое уравнение, прибавляемое к их средней долготе и равное 0.735 векового уравнения среднего движения. Таким образом, движение узлов замедляется, как и движение перигея, при возрастании движения Луны; и вековые уравнения этих трех движений постоянно относятся как числа 0.735, 3, 1. Отсюда легко заключить, что три движения Луны относительно Солнца, ее перигея и ее узлов ускоряются и что их вековые уравнения относятся между собой как числа 1, 4, 0.265.

Будущие века увеличат эти большие неравенства, которые со временем создадут изменения, равные, по меньшей мере, сороковой части окружности в вековом движении Луны и тринадцатой части окружности в вековом движении лунного перигея. Эти неравенства не всегда возрастают. Они периодические, так же как неравенства эксцентриситета земной орбиты, от которых они зависят, и восстанавливаются лишь через миллионы лет. С течением времени они должны изменить воображаемые периоды, охватывающие целые числа обращений Луны по отношению к ее узлам, к перигею и к Солнцу, периоды, заметно различающиеся в разных частях огромного периода векового уравнения. Лунно-солнечный период в 600 лет был точен в эпоху, вернуться к которой было бы легко путем анализа, если бы массы планет были точно известны. Но эти данные, столь желательные для совершенствования астрономических теорий, у нас еще отсутствуют. К счастью, Юпитер с хорошо известной массой является именно той планетой, которая больше всего влияет на вековое уравнение Луны, а значения масс других планет все же известны достаточно точно, чтобы не бояться значительной ошибки в численном выражении этого уравнения.

Уже древние наблюдения, несмотря на их несовершенство, подтверждают лунные неравенства, ход которых можно проследить как по наблюдениям, так и по астрономическим таблицам, сохранившимся до наших дней. Мы видели, что древние наблюдения затмений позволили заметить ускорение лунного движения раньше, чем теория тяготения объяснила его причину. Сопоставляя с этой теорией современные наблюдения, а также затмения, наблюдавшиеся арабами, греками и халдеями, мы находим между ними такое согласие, которое представляется изумительным, если принять во внимание несовершенство древних наблюдений и неуверенность, которая еще остается относительно изменений экс-

центриситета земной орбиты из-за неточного знания масс Венеры и Марса. Развитие вековых уравнений Луны будет одним из наиболее подходящих способов для определения этих масс.[32]

Было особенно интересно проверить теорию тяготения в отношении векового уравнения перигея лунной орбиты или аномалии, которая в четыре раза больше, чем вековое уравнение среднего движения. Ее открытие привело меня к заключению, что надо на 15—16$^c$ [8.1—8.′6] уменьшить применяемое астрономами теперешнее вековое движение перигея, которое они нашли, сравнивая современные наблюдения с древними. В самом деле, не приняв во внимание его вековое уравнение, они должны были получить это движение слишком быстрым, так же как они приписали слишком медленное движение Луне, не учтя ее вековое уравнение. Бувар и Бюрг подтвердили это, определив современное значение векового движения лунного перигея из очень большого числа современных наблюдений. Кроме того, Бувар обнаружил то же движение по самым древним наблюдениям и по наблюдениям арабов с учетом своего векового уравнения, чем неоспоримым образом подтвердил его справедливость.

Средние движения и эпохи таблиц «Альмагеста» и арабов указывают с очевидностью на три вековых уравнения Луны. Таблицы Птолемея являются результатом огромных вычислений, сделанных им и Гиппархом. Труды Гиппарха до нас не дошли. Мы знаем только, по свидетельству Птолемея, что Гиппарх приложил все усилия к тому, чтобы выбрать самые выгодные затмения для получения элементов, которые он определял. После двух с половиной веков новых наблюдений Птолемей лишь слегка изменил эти элементы. Поэтому несомненно, что элементы, использованные им в своих таблицах, были определены по очень большому числу затмений, из которых он упомянул только те, которые казались ему наиболее соответствующими средним результатам, полученным им и Гиппархом. Затмения позволяют хорошо определять только среднее синодическое движение Луны и ее расстояния от узлов и перигея ее орбиты. Поэтому в таблицах, приведенных в «Альмагесте», можно полагаться только на эти элементы. Возвращаясь во времени к первой эпохе этих таблиц, с помощью движений, определенных по одним современным наблюдениям, мы не получаем средних расстояний Луны от узлов, от перигея и от Солнца, даваемых этими таблицами для той эпохи. Величины, которые следует прибавить к этим расстояниям, близки к определяемым вековыми уравнениями. Следовательно, элементы этих таблиц подтверждают существование этих уравнений и тех численных значений, которые я им приписал.

Тот факт, что движения Луны относительно ее перигея и Солнца в таблицах «Альмагеста» медленнее, чем в таблицах нашего времени, указывает на присутствие в этих движениях ускорений, подобных ускорениям, на которые указывают как поправки, внесенные Альбатением восемь веков спустя после Птолемея в элементы его таблиц, так и эпохи таблиц Ибн-Юнуса, составленных около 1000 г. по совокупности халдейских, греческих и арабских наблюдений.

Замечательно, что уменьшение эксцентриситета земной орбиты гораздо заметнее по движению Луны, чем само по себе. Это уменьшение, которое со времени самого древнего из известных нам затмений не изменило даже на $15^c$ [8.′1] уравнение центра Солнца, произвело изменение в $2^g$ [1.°8] в долготе Луны и в $8^g$ [7.°2] в ее средней аномалии. По наблюдениям Гиппарха и Птолемея его можно было только предполагать, наблюдения арабов указывали на него с большой вероятностью. Но сопоставление древних затмений с теорией тяготения не оставляет никакого сомнения по этому поводу. Это «отражение», если можно так выразиться, вековых изменений земной орбиты через движение Луны под воздействием Солнца имеет место даже для периодических неравенств. Именно так уравнение центра земной орбиты вновь возникает в движении Луны, но с обратным знаком и уменьшенным приблизительно в 10 раз. Подобным же образом неравенство в движении Земли, вызванное действием Луны, воспроизводится в движении Луны ослабленным приблизительно в отношении 1 к 2. Наконец, действие Солнца, передавая на Луну неравенства, которые планеты вносят в движение Земли, делает это косвенное влияние планет на Луну более значительным, чем их непосредственное влияние на этот спутник.

Здесь мы видим пример того, как явления, раскрываясь, проливают свет на свои истинные причины. Когда было известно лишь ускорение среднего движения Луны, его можно было приписать сопротивлению эфира или последовательной передаче силы тяготения. Но математический анализ показывает нам, что эти две причины не могут произвести никаких заметных изменений в средних движениях лунных узлов и перигея. Одного этого было бы достаточно, чтобы исключить эти причины, даже тогда, когда истинная причина изменений, наблюденных в этих движениях, еще не была известна. Согласие теории с наблюдениями доказывает нам, что, если среднее движение Луны и изменено причинами, не относящимися к всемирному тяготению, то их влияние очень мало и до сих пор неощутимо.

Это согласие уверенно устанавливает постоянство длины суток, существенного элемента всех астрономических теорий. Если бы их продолжительность в настоящее время превышала на $1/100^c$ [$0.^s00864$] ту, что была во времена Гиппарха, длина теперешнего века оказалась бы больше, чем тогда, на $365.25^c$ [$315.^s58$]. За такой промежуток времени Луна описывает дугу в $534.^{cc}6$ [173.″2]. Поэтому теперешнее среднее годовое движение Луны оказалось бы увеличенным на эту же величину, что увеличило бы на $13.^{cc}51$ [4.″38] ее вековое уравнение для первого века, считая от 1801 г., которое, как было указано, равно $31.^{cc}5017$ [10.″2066]. Наблюдения не позволяют предположить такое значительное увеличение, и поэтому можно быть уверенным, что со времен Гиппарха длина суток [33] не изменилась даже на $1/100^c$ [$0.^s00864$].

Одно из наиболее важных уравнений лунной теории, зависящее от сжатия Земли, относится к движению Луны по широте. Это неравенство пропорционально синусу ее истинной долготы. Оно является результатом нутации лунной орбиты, производимой действием земного сфероида, и со-

ответствует той нутации нашего экватора, которая вызывается действием Луны, так что одна из этих нутаций является противодействием другой. Если бы все молекулы Земли и Луны были связаны между собой несгибаемыми и невесомыми стержнями, вся эта система в целом находилась бы в равновесии вокруг центра тяжести Земли вследствие сил, производящих эти две нутации, причем незначительность силы, движущей Луну, компенсировалась бы длиной рычага, к которому прилагалась бы эта сила. Это неравенство по широте может быть представлено, если вообразить, что плоскость лунной орбиты, вместо того, чтобы двигаться по эклиптике равномерно с постоянным наклоном, движется при таких же условиях по плоскости, немного наклоненной к эклиптике и постоянно проходящей через точки равноденствия между эклиптикой и экватором. Подобное явление воспроизводится в более заметном виде в движениях спутников Юпитера в силу значительного сжатия этой планеты. Таким образом, это неравенство уменьшает наклон лунной орбиты к эклиптике, когда ее восходящий узел совпадает с точкой весеннего равноденствия. Оно увеличивает этот наклон, когда узел совпадает с точкой осеннего равноденствия, что было в 1755 г. и слишком увеличило наклон, который Мейсон определил из наблюдений Брадлея, сделанных с 1750 по 1760 гг. В самом деле, Бюрг, определивший его из наблюдений, охвативших большой период времени, и принявший в расчет предыдущее неравенство, получил наклонность, меньшую на 11.$^{cc}$5 [3,″7]. Этот астроном по моей просьбе любезно согласился определить коэффициент этого неравенства по очень большому числу наблюдений и нашел, что он равен —24.$^{cc}$6914 [—8.″0]. Бурххардт, использовав еще большее число наблюдений, пришел к тому же результату, по которому сжатие Земли равно 1/304.6.

Это сжатие можно определить еще с помощью неравенства лунного движения по долготе, которое зависит от долготы лунных узлов. Наблюдения указали на это Майеру, и Мейсон установил его величину в 23.$^{cc}$765 [7.″70]. Но так как оно не казалось вытекающим из теории тяготения, большинство астрономов игнорировали это неравенство. Однако эта теория показала мне, что его причина лежит в сжатии Земли. Бюрг и Бурххардт из большого числа наблюдений установили его величину в 20.$^{cc}$987 [6.″80], что соответствует сжатию 1/305.05, т. е. почти такому же, какое дает предыдущее неравенство движения по широте. Итак, по наблюдениям движений Луны усовершенствованная астрономия обнаружила эллиптичность Земли, шаровидность которой первые астрономы узнали по наблюдениям ее затмений.

Два предыдущих неравенства заслуживают всяческого внимания астрономов. Перед геодезическими измерениями они имеют то преимущество, что сжатие Земли они представляют способом, менее зависящим от неправильности ее фигуры. Если бы Земля была однородна, эти неравенства были бы значительно больше, чем следует из наблюдений, которые, следовательно, исключают эту однородность. Еще из этих наблюдений следует, что сила притяжения Луны к Земле складывается из притяжения всех молекул этой планеты, что доставляет новое доказательство того, что притягиваются все частицы материи.

Теория в сочетании с опытами над маятниками и градусными измерениями, как мы видели в первой книге, дает параллакс Луны, очень близкий к наблюдениям, так что можно было бы обратным путем из этих наблюдений определить размеры Земли.

Наконец, с помощью лунного уравнения по долготе, зависящего просто от углового расстояния Луны от Солнца, можно точно определить солнечный параллакс. Для этого я с особой тщательностью вычислил коэффициент этого уравнения и, приравняв его к коэффициенту Буркхардта и Бюрга, который они нашли из сравнения большой серии наблюдений, вывел средний солнечный параллакс, равный 26.$^{cc}$58 [8.″6], т. е. такой же, какой многие астрономы определили из последнего прохождения Венеры.*

Замечательно, что астроном, не выходя из своей обсерватории, а лишь сравнивая свои наблюдения с результатами математического анализа, смог точно определить размеры и сжатие Земли, а также ее расстояние от Солнца и Луны, т. е. те элементы, определение которых было плодом долгих и трудных путешествий по обоим полушариям Земли. Согласие результатов, полученных этими двумя методами, является одним из наиболее поразительных доказательств всемирного тяготения.

Наши лучшие лунные таблицы основаны на теории и на наблюдениях. Из теории они заимствуют аргументы неравенств, которые было бы очень трудно узнать из одних только наблюдений. В моем «Трактате о небесной механике» я определил коэффициенты этих аргументов с очень большим приближением. Но малая сходимость приближений и трудность выделения из огромного числа тех членов, даваемых анализом, которые при интегрировании могут достичь заметной величины, делает очень трудными поиски этих коэффициентов. Сама природа дает нам в собрании наблюдений результаты этих интегрирований, с таким трудом получаемых из анализа. Для их определения Буркхардт и Бюрг использовали многие тысячи наблюдений и таким путем придали высокую точность своим лунным таблицам. Желая изгнать всякий эмпиризм и предложить другим геометрам обсудить многие сложные вопросы теории, к которым я подошел первым, такие, например, как вековые уравнения движения Луны, я добился от Академии наук, чтобы она предложила темой работы по математике на премию 1820 г. составление на основании одной только теории лунных таблиц, столь же совершенных, какие были составлены путем совместного применения теории и наблюдений. Академией были награждены две работы. Автор одной из них, г-н Дамуазо, сопроводил ее таблицами, которые при сравнении с наблюдениями представили их с точностью наших лучших таблиц. Авторы обеих работ сходятся относительно периодических и вековых неравенств движения Луны. Их результаты немного отличаются от моего в определении векового уравнения среднего движения; но вместо чисел 1, 4, 0.265, которыми я представил отношения вековых уравнений движения Луны относительно Солнца, перигея лунной орбиты и ее узлов, они нашли числа 1, 4.6775, 0.391. Г-н Дамуазо в своей работе дал второе из этих чисел очень близким к 4, но, пересмо-

* Имеется в виду прохождение 1769 г. (Прим. перев.).

трев свои вычисления с особой тщательностью, он пришел к результату г-д Плана и Карлини — авторов второй работы. Так как они очень далеко продвинули приближения, их числа, вероятно, предпочтительнее, чем определенные мной. К тому же эти приближения дали им движения перигея и узлов лунной орбиты, в точности совпадающие с наблюдениями.

Из изложенного неоспоримо следует, что закон всемирного тяготения является единственной причиной всех лунных неравенств; и если учесть большое число и величину этих неравенств и близость Луны к Земле, можно считать, что из всех небесных тел она больше всего подходит, чтобы утвердить этот великий закон природы и могущество математического анализа, этого чудесного инструмента, без которого человеческому уму было бы невозможно проникнуть в столь сложную теорию и который может быть применен как такой же надежный способ совершать открытия, как и сами наблюдения.

Некоторые приверженцы конечных причин воображали, что Луна была придана Земле, чтобы освещать ее в ночное время. В таком случае природа не достигла поставленной себе цели, потому что часто мы лишены одновременно и солнечного, и лунного света. Чтобы достичь этой цели, было бы достаточно первоначально поместить Луну в противостояние с Солнцем в самой плоскости эклиптики на расстоянии от Земли, равном 1/100 расстояния Земли от Солнца, и дать и Луне, и Земле параллельные скорости, пропорциональные их расстояниям от этого светила. Тогда Луна, непрерывно находясь в противостоянии с Солнцем, описывала бы вокруг него эллипс, подобный земному. Эти два светила следовали бы одно за другим по горизонту, и так как на этом расстоянии Луна не затмевалась бы, ее свет постоянно заменял бы свет Солнца.[34]

Другие философы, пораженные своеобразным мнением жителей Аркадии, считавших себя более древними, чем Луна, думали, что этот спутник был первоначально кометой, которая, пройдя слишком близко к Земле, была вынуждена под влиянием ее притяжения последовать за ней. Но восходя путем анализа к самым отдаленным временам, мы видим, что Луна все время движется по почти круговой орбите, как планета вокруг Солнца. Поэтому ни Луна, ни какой-либо спутник, не были вначале кометами.

Так как тяжесть на поверхности Луны гораздо меньше, чем на поверхности Земли, и поскольку это светило не имеет атмосферы, которая могла бы оказать заметное сопротивление движению бросаемых тел, можно заключить, что тело, выброшенное с большой силой взрывом лунного вулкана, может достичь и перейти тот предел, где притяжение Земли начинает превосходить лунное притяжение. Для этого достаточно начальной скорости по вертикали в 2500 м в секунду. Тогда вместо того, чтобы снова упасть на Луну, это тело сделается спутником Земли и будет описывать вокруг нее более или менее вытянутую орбиту. Его начальный импульс может быть направлен таким образом, что оно непосредственно встретит земную атмосферу. Оно может также достичь ее лишь после нескольких или даже очень многих обращений, так как ясно, что действие Солнца, которое очень заметно меняет расстояние Луны от

Земли, должно производить в радиусе-векторе спутника, движущегося по очень эксцентричной орбите, еще значительно большие изменения и со временем может изменить перигельное расстояние спутника так, что он проникнет в нашу атмосферу. Это тело, пересекая ее с большой скоростью, испытывало бы очень большое сопротивление и вскоре упало бы на Землю. Трения воздуха об его поверхность было бы достаточно, чтобы его воспламенить и заставить взорваться, если оно заключало в себе вещества, способные к этому, и тогда оно продемонстрировало бы нам все эффекты, являемые аэролитами. Если бы было хорошо доказано, что они не являются продуктом наших вулканов или атмосферы и что нужно искать их происхождение вне Земли, в небесном пространстве, высказанная выше гипотеза, которая к тому же объясняет тождество состава метеоритов одинаковостью их происхождения, была бы не лишена правдоподобия.

## Глава VI

## О ВОЗМУЩЕНИЯХ СПУТНИКОВ ЮПИТЕРА

Из всех спутников наиболее интересными после Луны являются спутники Юпитера. Наблюдение этих светил, первых из числа открытых на небе с помощью телескопа, не насчитывает и двух веков, а их затмения наблюдаются даже меньше чем полтора столетия. Но в этом коротком промежутке времени, благодаря быстроте своего обращения, они продемонстрировали нам все большие изменения, которые с исключительной медленностью время разворачивает в планетной системе, чьим подобием является система спутников. Неравенства, производимые их взаимным притяжением, мало отличаются от планетных и лунных, однако соотношения, существующие между средними движениями первых трех спутников, делают некоторые из этих неравенств весьма значительными, что имеет большое влияние на всю их теорию. Во второй книге мы видели, что эти движения находятся между собой почти в отношении одного к двум и что они подвержены значительным неравенствам с различными периодами, которые при затмениях сводятся к одному единственному периоду в 437.659 суток. В теории спутников эти неравенства предстают первыми, так как они первыми были замечены наблюдателями. Теория не только определяет эти неравенства, но также подтверждает то, на что уже раньше с большой вероятностью указывали наблюдения, а именно, что неравенство второго спутника является результатом двух неравенств, из которых одно возникает от действия первого спутника и изменяется как синус избытка долготы первого спутника над долготой второго, а другое, производимое действием третьего спутника, изменяется как синус удвоенного избытка долготы второго спутника над долготой третьего. Таким образом, второй спутник испытывает со стороны первого возмущение, подобное тому, которое он производит в третьем, а со стороны третьего сам испытывает возмущение, подобное тому, какое сам вызывает у первого. Эти два неравенства объединяются в одно вследствие

соотношений, которые существуют между средними движениями и средними долготами трех первых спутников и согласно которым среднее движение первого спутника в сумме с удвоенным движением третьего равно утроенному движению второго, а средняя долгота первого спутника в сумме с удвоенной долготой третьего без утроенной долготы второго постоянно равна полуокружности. Но всегда ли будут существовать эти соотношения или они являются только приближениями? И два неравенства второго спутника, объединенные сегодня, не разделятся ли с течением времени? Теория дает ответы на эти вопросы.

Приближение, с которым таблицы давали упоминавшиеся выше соотношения, побудило меня предположить, что эти соотношения являются совершенно точными, а небольшие отклонения от них возникают от неизбежных погрешностей. Было совершенно невероятно предположить, что первоначальное положение трех близких спутников и их взаимные расстояния, соответствующие этим соотношениям, возникли случайно. Но с большой вероятностью можно считать, что расположение имеет особые причины. Я искал эту причину во взаимодействии спутников. Углубленное рассмотрение этого взаимодействия показало мне, что именно благодаря ему эти соотношения стали точными. Отсюда я заключил, что если вновь определить их из анализа очень большого числа удаленных друг от друга наблюдений, средние долготы и средние движения трех первых спутников еще больше приблизятся к этим соотношениям, которым таблицы должны строго соответствовать. Я с удовлетворением убедился, что это следствие теории с замечательной точностью подтверждается изысканиями над спутниками Юпитера, проведенными Деламбром. Нет необходимости в том, чтобы рассматриваемые соотношения существовали с самого начала. Надо только, чтобы движения и долготы первых трех спутников не сильно отклонялись от них, и тогда взаимодействия этих спутников достаточно для того, чтобы установить и в строгости поддерживать эти соотношения. Однако небольшая разница между ними и первоначальными соотношениями создала неравенство произвольной величины, распределяющееся между тремя спутниками, которое я назвал *либрацией*. Две произвольные постоянные этого неравенства заменяют те произвольные величины, которые устраняются двумя предыдущими соотношениями из средних движений и из эпох средних долгот трех первых спутников, так как число произвольных постоянных, заключающихся в теории системы тел, должно быть в 6 раз больше числа этих тел. Так как анализ наблюдений не позволил обнаружить это неравенство, оно должно быть очень мало и даже неощутимо.

Рассматриваемые отношения будут существовать всегда, несмотря на то, что средние движения спутников подвержены вековым уравнениям, аналогичным уравнениям движения Луны. Они будут существовать даже в случае, если эти движения изменятся сопротивлением эфира или другими причинами, влияние которых было бы заметно только с течением времени. Во всех этих случаях вековые уравнения этих движений согласуются между собой взаимодействием спутников так, что вековое уравнение первого в сумме с удвоенным вековым уравнением третьего равно утроен-

ному вековому уравнению второго. Даже их неравенства, растущие чрезвычайно медленно, приближаются тем ближе к согласованию, чем длиннее их периоды. Эта либрация, приводящая движение трех первых спутников к взаимному согласованию по законам, которые мы сформулировали, распространяется и на их вращательные движения, если, как указывают наблюдения, эти движения равны их обращениям. В данном случае притяжение Юпитера поддерживает это неравенство, сообщая вращательным движениям такие же вековые уравнения, какие действуют на движение обращения. Итак, три первых спутника Юпитера образуют систему тел, связанных между собой неравенствами и приведенными выше соотношениями, которые будут непрерывно поддерживаться их взаимными действиями, по крайней мере, до тех пор, пока какая-либо внешняя причина внезапно не нарушит их движение и их взаимные положения. Такой причиной могла бы быть комета, которая, проходя через систему, подобно тому, как это, по-видимому, сделала первая комета 1770 г., ударила бы одно из этих тел. Весьма вероятно, что такие встречи уже случались в безмерности веков, протекших с начала существования планетной системы. Удара кометы, масса которой была бы равна только 1/100 000 массы Земли, было бы достаточно, чтобы сделать заметной либрацию спутников. Но так как это неравенство не было обнаружено несмотря на все старания, приложенные Деламбром, чтобы выделить его из наблюдений, мы должны заключить, что массы комет, которые могли встретиться с одним из трех спутников Юпитера, исключительно малы, что подтверждает уже сделанные нами замечания относительно малости кометных масс.

Если принять во внимание незначительность разности, существующей между пятикратным средним движением Сатурна и удвоенным средним движением Юпитера, видно, что небольшого изменения первоначальных средних расстояний между этими двумя планетами было бы достаточно, чтобы сделать ее равной нулю. Но это даже не было необходимо, так как взаимное притяжение двух планет уже сделало бы эту разность постоянно равной нулю в случае, если первоначально она ему не была равна, лишь бы только она заключалась в узких пределах, даваемых анализом: около 4/10 наблюденной разности. Чтобы ввести ее в эти пределы, достаточно было увеличить на 1/530 среднее расстояние Сатурна от Солнца и уменьшить на 1/1300 среднее расстояние Юпитера. Итак, требовалось очень немного, чтобы две самые большие планеты солнечной системы продемонстрировали явление, аналогичное феномену трех первых спутников Юпитера, но значительно усложненное из-за своего большого влияния на вековые изменения орбит этих планет.

Орбиты спутников испытывают изменения, подобные большим изменениям планетных орбит. Их движения также подчинены вековым уравнениям, подобным вековым уравнениям Луны. Развитие всех этих неравенств с течением времени доставит нам наиболее подходящие данные для определения масс спутников и сжатия Юпитера. Значительное влияние этого последнего элемента на движение узлов определяет его значение с такой же точностью, как и непосредственные измерения. По этому

методу отношение малой оси Юпитера к диаметру его экватора получается равным 0.9368, что очень мало отличается от отношения 16 к 17, полученного как среднее из самых точных измерений сжатия этой планеты. Это согласие является еще новым доказательством того, что тяготение спутников к своей планете составляется из притяжения всех их молекул.

Один из самых любопытных результатов теории спутников Юпитера состоит в определении их масс, что из-за исключительной малости их размеров и невозможности измерить их диаметры казалось недоступным. Для этого я выбрал исходные данные, которые при современном состоянии астрономии показались мне наиболее подходящими, и думаю, что следующие выведенные мной величины весьма близки к истине.

Массы спутников Юпитера, масса которого принята за единицу:

| | |
|---|---|
| I спутник | 0.0000173281, |
| II спутник | 0.0000232355, |
| III спутник | 0.0000884972, |
| IV спутник | 0.0000426591. |

Эти величины будут уточнены, когда с течением времени станут лучше известны вековые изменения орбит.

Каково бы ни было совершенство теории, астроному следует еще выполнить громадную работу, чтобы обратить аналитические формулы в таблицы. Эти формулы включают 31 неопределенную постоянную, именно, 24 произвольные постоянные 12 дифференциальных уравнений движения спутников, массы этих светил, сжатие Юпитера, наклонность его экватора и положение его узлов. Чтобы получить значение этих неизвестных, надо рассмотреть очень большое число затмений каждого спутника и комбинировать их так, чтобы наилучшим способом определялось каждое неизвестное. Деламбр выполнил эту важную работу с величайшим успехом, и его таблицы, представляющие наблюдения с точностью самих наблюдений, дают возможность мореплавателю надежно и просто по наблюдениям затмений спутников, в основном первого, получать на месте долготу пункта, где он пристал к берегу. Вот главные элементы теории каждого спутника, вытекающие из сделанных Деламбром сравнений моих формул с наблюдениями.

Орбита первого спутника движется равномерно, сохраняя неизменный наклон по отношению к неподвижной плоскости, постоянно проходящей между экватором и орбитой Юпитера через линию пересечения двух последних плоскостей, взаимный наклон которых по наблюдениям равен $3.^{g}4352$ [$3.^{\circ}0917$]. Наклон этой неподвижной плоскости относительно экватора Юпитера по теории всего лишь $20^{cc}$ [$6.''5$] и, следовательно, неощутим. Также неощутим для наблюдений и наклон орбиты спутника к этой плоскости. Поэтому можно считать, что первый спутник движется в экваториальной плоскости Юпитера. Не был обнаружен и собственный эксцентриситет орбиты этого спутника, который лишь в малой степени зависит от эксцентриситетов третьего и четвертого спутников, так как из-за взаимодействия всех этих тел эксцентриситет, свойственный орбите

каждого из них, распространяется на все другие, но в ослабленном виде в соответствии с их удаленностью. Единственное заметное неравенство этого спутника имеет аргументом удвоенный избыток средней долготы первого спутника над средней долготой второго. В возвращениях затмений оно производит неравенство в 437.659 суток. Это одно из тех неравенств, которые я использовал, чтобы получить массы спутников; так как это неравенство вызвано только влиянием второго спутника, оно определяет его массу с большой точностью.

Затмения первого спутника Юпитера позволили открыть поступательное движение света, которое позже лучше узнали по явлению аберрации. Мне казалось, что поскольку теория этого спутника теперь улучшена, а число наблюденных затмений стало очень большим, их новое рассмотрение должно было бы определить величину аберрации с еще большей точностью, чем непосредственные наблюдения. По моей просьбе Деламбр любезно согласился выполнить эту работу и получил значение полной аберрации, равное $62.^{cc}5$ [20.″2] — величину, в точности совпадающую с найденной Брадлеем из своих паблюдений. Доставляет удовлетворение видеть такое прекрасное согласие результатов, полученных совершенно различными методами. Из этого согласия следует, что скорость света одинакова во всем пространстве, охваченном земной орбитой. В самом деле, скорость света, даваемая аберрацией, это — та, которая имеет место на окружности земной орбиты и, складываясь с движением Земли, производит это явление. Скорость света, выведенная по затмениям спутников Юпитера, определяется временем, затраченным светом на пересечение земной орбиты. Так как эти две скорости оказываются равными, то скорости света одинаковы по всему диаметру земной орбиты. Из данных о затмениях спутников Юпитера даже следует, что она неизменна и в пространстве, заключенном в орбите Юпитера, так как вследствие эксцентричности этой орбиты вариации ее радиусов-векторов заметно отражаются на затмениях спутников, а анализ этих затмений показал, что этот эффект соответствует неизменной скорости света.

Если свет испускается светящимися телами, то равенство скорости их лучей требует, чтобы они излучались каждым телом с одинаковой силой и чтобы их движение не задерживалось заметно притяжением, испытываемым ими со стороны посторонних тел. Если считать, что свет представляет собой вибрации упругого флюида, неизменность его скорости требует, чтобы плотность этого флюида во всем пространстве планетной системы была пропорциональна его упругости. Но исключительная простота, с которой объясняется аберрация небесных светил и явление преломления света при переходе из одной среды в другую, если считать свет излучением светящихся тел, делает эту гипотезу, по крайней мере, очень вероятной.

Плоскость орбиты второго спутника движется равномерно с постоянным наклоном к неподвижной плоскости, проходящей неизменно между экватором и орбитой Юпитера, через линию их взаимного пересечения с наклоном к экватору, составляющим $201^{cc}$ [65″]. Орбита спутника наклонена к его неподвижной плоскости на $5152^{cc}$ [1669″], а ее узлы дви-

жутся по этой плоскости попятным тропическим движением с периодом в 29.9142 лет. Этот период послужил мне одной из исходных данных для определения масс спутников. Наблюдения не позволили определить собственный эксцентриситет орбиты этого спутника, но он немного влияет на эксцентриситеты третьего и четвертого спутников. Два главных неравенства второго спутника зависят от действия первого и третьего. Отношение, существующее между долготами первых трех спутников, навсегда объединяет эти два неравенства в одно, причем период его в возвращении затмений равен 437.659 суток — величине, которая явилась третьей величиной, использованной мною для определения масс спутников.

Плоскость орбиты третьего спутника движется равномерно с неизменным наклоном к неподвижной плоскости, проходящей постоянно между экватором и орбитой Юпитера, через линию их взаимного пересечения и с наклоном к экватору, равным $931^{cc}$ [302″]. Орбита спутника наклонена на $2284^{cc}$ [740″] к его неподвижной плоскости, и ее узлы перемещаются по ней попятным тропическим движением с периодом 141.739 года. Астрономы предполагали, что орбиты трех первых спутников Юпитера движутся в самой плоскости экватора Юпитера. Но из затмений третьего спутника они находили немного меньшее наклонение орбиты планеты к этому экватору, чем из затмений двух других. Эта разница, причина которой была им неизвестна, происходит оттого, что орбиты спутников движутся с постоянным наклоном не к этому экватору, а к другим плоскостям, которые к нему наклонены тем более, чем дальше спутник отстоит от планеты. Как мы видели в предыдущей главе, Луна являет нам подобный же результат. Отсюда происходит неравенство лунного движения по широте, величина которого определяет сжатие Земли, может быть, точнее, чем градусные измерения по меридиану.

Эксцентриситет орбиты третьего спутника имеет особые аномалии, причину которых я узнал благодаря теории. Они зависят от двух различных уравнений центра. Одно, присущее этой орбите, относится к перийовию, годичное звездное движение которого равно $29\,010^{cc}$ [9400″]. Другое, которое можно рассматривать как вытекающее из уравнения центра четвертого спутника, относится к перийовию этого последнего тела. Оно также представляло одну из величин, послуживших мне для определения масс. Сочетаясь, эти два уравнения дают одно переменное уравнение центра, относящееся к перийовию с неравномерным движением. Они совпадали и складывались в 1682 г., и тогда их сумма возросла до $2458^{cc}$ [796″]. В 1777 г. они вычитались одно из другого, и их разность составляла лишь $949^{cc}$ [307″]. Варгентин попробовал представить эти изменения с помощью двух уравнений центра. Но он не отнес одно из них к перийовию четвертого спутника, и наблюдения заставили его отказаться от своей гипотезы; тогда он прибег к гипотезе одного переменного уравнения центра, изменения которого он определил из наблюдений. Это привело его почти к тем же результатам, на которые мы указывали.

Наконец, плоскость орбиты четвертого спутника движется равномерно, с постоянным наклоном к неподвижной плоскости, которая наклонена к экватору Юпитера на $4457^{cc}$ [1444″] и которая проходит через линию узлов этого экватора между ним и орбитой планеты. Наклон орбиты спутника к его неподвижной плоскости равен $2772^{cc}$ [898″], и ее узлы в этой плоскости имеют попятное тропическое движение с периодом в 531 год. В силу этого движения наклон орбиты четвертого спутника к орбите Юпитера непрерывно изменяется. Дойдя до своего минимума вблизи середины прошлого века, он был около $2.^{g}7$ [2.°4] и почти постоянен с 1680 по 1760 гг. В этом интервале узлы орбиты спутника на орбите Юпитера имели прямое годичное движение около $8^{c}$ [4.′3]. За это обстоятельство, выявленное наблюдениями, ухватились астрономы и долго с успехом использовали его для таблиц этого спутника. Оно является следствием теории, которая дает наклонность и движение узлов, весьма близкие к найденным астрономами из анализа наблюдений затмений. Но в последние годы наклонность орбиты получила очень заметное увеличение, закон которого было бы трудно найти, не прибегая к математическому анализу. Любопытно видеть, как из аналитических формул появляются странные явления, указанные наблюдениями, но которые, являясь результатом нескольких простых неравенств, слишком сложны, чтобы астрономы могли открыть их законы. Эксцентриситет орбиты четвертого спутника гораздо больше, чем у других орбит. Его перийовий имеет прямое годичное движение в $7959^{cc}$ [2579″]. Это — пятая величина, использованная мной для вычисления масс.

Каждая орбита немного зависит от движения других. Постоянные плоскости, к которым мы их отнесли, не совсем неподвижны. Они очень медленно движутся вместе с экватором и орбитой Юпитера, всегда проходя через взаимное пересечение этих плоскостей и сохраняя по отношению к экватору Юпитера наклонности, хотя и изменяющиеся, но находящиеся в постоянном отношении между собой и с наклоном орбиты планеты к экватору.

Таковы главные результаты сравнения теории спутников Юпитера с многочисленными наблюдениями их затмений. Наблюдения появления и исчезновения теней спутников на диске Юпитера пролили бы много света на некоторые элементы этой теории. До сих пор астрономы пренебрегали наблюдениями такого рода, но, как мне кажется, они должны привлечь их внимание, так как, по-видимому, внутренние контакты теней должны определять момент соединения еще точнее, чем затмения. Теория спутников в настоящее время настолько продвинулась вперед, что недостающее ей может быть определено только очень точными наблюдениями. Поэтому становится необходимым испытать новые методы наблюдений или, по крайней мере, убедиться, что применяемые теперь заслуживают предпочтения.

## Глава VII

### О СПУТНИКАХ САТУРНА И УРАНА

Исключительная трудность наблюдения спутников Сатурна делает их теорию такой несовершенной, что нам едва известны с некоторой степенью точности их обращения и средние расстояния до центра этой планеты. Поэтому до сих пор бесполезно рассматривать их возмущения. Но положение их орбит представляет явление, заслуживающее внимания геометров и астрономов.

Орбиты первых шести спутников кажутся находящимися в плоскости кольца, тогда как орбита седьмого заметно от него отклоняется. Естественно думать, что это зависит от влияния Сатурна, который вследствие своего сжатия удерживает первые шесть орбит и свои кольца в плоскости своего экватора. Воздействие Солнца стремится их отклонить. Но это отклонение, возрастающее очень быстро, приблизительно как пятая степень радиуса орбиты, становится ощутимым только для последнего спутника. Орбиты спутников Сатурна, как и орбиты спутников Юпитера, движутся в плоскостях, постоянно проходящих между экватором и орбитой планеты, через их взаимное пересечение, в плоскостях, тем более наклоненных к этому экватору, чем спутники более удалены от Сатурна. Это наклонение у последнего спутника значительно и, если основываться на имеющихся наблюдениях, близко к $24.^{g}0$ $[21.^{\circ}6]$. Орбита спутника наклонена к этой плоскости под углом в $16.^{g}96$ $[15.^{\circ}26]$, и годичное движение ее узлов в этой плоскости равно $940^{cc}$ $[305'']$. Но поскольку эти наблюдения очень ненадежны, приведенные данные являются лишь очень грубым приближением.[35]

Относительно спутников Урана мы знаем еще меньше. По наблюдениям Гершеля представляется, что они все движутся в одной плоскости, почти перпендикулярной плоскости орбиты планеты, что, очевидно, указывает на подобное же положение плоскости его экватора. Анализ показывает, что сжатие планеты, сочетаясь с действием спутников, может удерживать их орбиты очень близко к этой плоскости. Вот все, что можно сказать об этих светилах, которые из-за их удаленности и малости еще долго не будут поддаваться более подробным исследованиям.

## Глава VIII

### О ФИГУРЕ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ И О ЗАКОНЕ ТЯЖЕСТИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

В первой книге мы изложили то, что стало известно о фигуре Земли и планет из наблюдений. Сравним теперь эти данные с результатами, вытекающими из всемирного тяготения.

Сила тяготения к планетам складывается из притяжения всех их молекул. Если бы их массы были жидкими и не имели вращательного движения, их фигура, как и фигура всех их слоев, была бы сфериче-

ской, причем слои, наиболее близкие к центру, были бы самыми плотными. Сила тяжести на их внешней поверхности и на любом расстоянии снаружи от нее была бы в точности такой, как если бы вся масса планеты была сосредоточена в ее центре тяжести. Это — замечательное свойство, в силу которого Солнце, планеты, кометы и спутники действуют друг на друга почти так же, как материальные точки.

На больших расстояниях притяжение молекул тела любой формы, наиболее удаленных от притягиваемой точки и наиболее близких к ней, действует так, что полное притяжение оказывается почти таким же, как если бы все эти молекулы были собраны в их центре тяжести; если отношение размеров тела к его расстоянию от притягиваемой точки принять за очень малую величину первого порядка, то такой вывод будет точен до величин второго порядка. Но он является строгим для сферы, а для сфероида, немного от нее отличающегося, ошибка будет того же порядка, как произведение его эксцентриситета на квадрат отношения его радиуса к расстоянию до притягиваемой точки.

Свойство сферы притягивать так же, как если бы вся ее масса была сосредоточена в центре, способствует простоте движения небесных тел. Эта простота свойственна не только закону природы, но еще и закону притяжения, пропорционального простому расстоянию, и может быть присущей лишь законам, образованным сложением этих двух простых законов. Но из всех законов, сводящих силу тяготения на бесконечном расстоянии к нулю, закон природы является единственным, при котором сфера обладает упомянутым выше свойством.

По этому закону тело, помещенное внутрь сферического слоя, имеющего всюду одинаковую толщину, одинаково притягивается со всех сторон так, что оно остается в покое среди испытываемых им притяжений. То же самое имеет место внутри эллиптического слоя, у которого внутренняя и внешняя поверхности подобны и подобно расположены. Поэтому если предположить, что планеты представляют собой однородные сферы, сила тяжести внутри них будет уменьшаться как расстояние до центра, так как внешние относительно притягиваемого тела слои ничего не прибавляют к ее силе тяжести, которая, таким образом, порождается только притяжением сферы с радиусом, равным расстоянию этого тела от центра планеты. Это притяжение пропорционально массе сферы, разделенной на квадрат ее радиуса, а так как масса пропорциональна кубу этого радиуса, сила тяжести тела пропорциональна этому радиусу. Но вследствие того, что слои планеты, вероятно, имеют бóльшую плотность по мере приближения к центру, сила тяжести в них уменьшается в меньшем отношении, чем в случае однородности слоев.

Вращение планет немного изменяет их сферическую форму. Центробежная сила, возникающая от этого вращения, расширяет их у экватора и сжимает у полюсов. Рассмотрим сперва влияние этого сжатия в самом простом случае, считая Землю однородной жидкой массой, а силу тяжести — направленной к ее центру и обратно пропорциональной квадрату расстояния от этой точки. Легко доказать, что в этом случае земной сфероид превращается в эллипсоид вращения, так как если

представить себе два жидких столба, соединяющихся в центре сфероида и оканчивающихся: один — на полюсе, а другой — в какой-либо точке его поверхности, ясно, что они должны взаимно уравновеситься. Центробежная сила не изменяет вес столба, направленного на полюс, но уменьшает вес другого столба. В центре Земли центробежная сила равна нулю. На поверхности она пропорциональна радиусу земной параллели, т. е. величине, близкой к косинусу широты. Но она не вся целиком расходуется для уменьшения силы тяжести. Направления этих двух сил составляют угол, равный широте, и центробежная сила, разложенная по направлению силы тяжести, ослабляется в отношении косинуса этого угла к радиусу. Таким образом, на какой-либо параллели поверхности Земли центробежная сила уменьшает силу тяжести на произведение экваториальной центробежной силы на квадрат косинуса широты. Поэтому средняя величина этого уменьшения в тяжести столба жидкости равна половине этого произведения, а так как центробежная сила на экваторе равна 1/289 силы тяжести, эта величина равна 1/578 силы тяжести, умноженной на квадрат косинуса широты. Для равновесия необходимо, чтобы столб своей длиной компенсировал уменьшение своего веса. Поэтому он должен быть больше столба, идущего к полюсу, на 1/578 его величины, умноженной на квадрат того же косинуса. Таким образом, увеличение земных радиусов от полюса к экватору пропорционально этому квадрату, откуда легко заключить, что Земля в этом случае есть эллипсоид вращения, у которого полярная ось относится к экваториальной как 577 к 578.

Ясно, что равновесие жидкой массы продолжало бы существовать, если предположить, что часть ее отвердела, при условии, что сила тяжести остается без изменения.

Чтобы определить закон изменения силы тяжести на поверхности Земли, заметим, что сила тяжести в какой-либо точке этой поверхности меньше, чем на полюсе, из-за большего удаления от центра. Это уменьшение почти в точности равно удвоенному увеличению земного радиуса, и, следовательно, оно равно произведению 1/289 силы тяжести на квадрат косинуса широты. Центробежная сила еще уменьшает вес на такую же величину. Таким образом, из-за совместного действия этих двух причин уменьшение веса от полюса к экватору равно числу 0.00694, умноженному на квадрат косинуса широты, причем сила тяжести на экваторе принята здесь за единицу.

Мы видели в первой книге, что измерения градусов меридианов дают сжатие Земли большее, чем 1/578, а маятниковые измерения указывают на уменьшение тяжести от полюса к экватору, меньшее, чем 0.00694, и равное 0.0054. Следовательно, градусные измерения как и наблюдения маятников свидетельствуют о том, что сила тяжести направлена не в одну единственную точку, что подтверждает *a posteriori* то, что нами уже было показано, а именно, что она составлена из притяжений всех молекул Земли.

В этом случае закон, по которому изменяется тяжесть, зависит от фигуры земного сфероида, в свою очередь зависящей от закона тяжести.

Эта взаимная зависимость двух неизвестных величин очень затрудняет исследование фигуры Земли. К счастью, эллиптическая фигура, самая простая из всех замкнутых фигур после сферы, удовлетворяет равновесию наделенной вращательным движением жидкой массы, у которой все молекулы притягиваются обратно пропорционально квадратам расстояния. Ньютон удовольствовался этим предположением и, исходя из этой гипотезы и полагая Землю однородной, нашел, что две оси этой планеты относятся как 229 к 230. Отсюда легко вывести закон изменения веса на Земле. Для этого рассмотрим различные точки, расположенные на одном и том же радиусе, проведенном из центра к поверхности однородной жидкой массы, находящейся в равновесии. Все подобные эллиптические слои, которые покрывают какую-либо из них, не сказываются на ее весе, и равнодействующая притяжений, которые она испытывает, зависит исключительно от притяжения эллипсоида, подобного полному эллипсоиду, поверхность которого проходит через эту точку. Одинаковые и подобно расположенные молекулы этих двух эллипсоидов притягивают эту точку и соответствующую ей точку на внешней поверхности пропорционально массам, разделенным на квадраты расстояний. Массы относятся как кубы соответствующих размеров этих двух эллипсоидов, а квадраты расстояний относятся как квадраты тех же размеров. Поэтому притяжения подобных молекул пропорциональны этим размерам, откуда следует, что полные притяжения обоих эллипсоидов находятся в таком же отношении, и их направления параллельны. Центробежные силы в двух точках, которые мы рассматриваем, тоже пропорциональны тем же размерам, а силы тяжести в них, являющиеся равнодействующими всех этих сил, относятся между собой как их расстояния от центра жидкой массы.

Теперь, если представить себе два столба жидкости, направленных из центра сфероида: один — к полюсу, а другой — к какой-либо точке его поверхности, ясно, что если сфероид сжат очень мало, силы тяжести, разложенные по направлениям этих столбов, будут почти такими же, как и полные силы тяжести. Поэтому, разделив оба столба на равное число бесконечно малых частей, пропорциональных их длине, получим, что веса соответствующих частей будут относиться между собой как произведения длин этих столбов на вес в точках поверхности, где они кончаются. В результате полные веса этих столбов жидкости будут находиться в том же отношении. Для равновесия эти веса должны быть равны. Следовательно, веса на поверхности должны быть обратно пропорциональны длине столбов. А так как радиус экватора длиннее полярного на 1/230, вес на полюсе должен на 1/230 превышать вес на экваторе.

Это предполагает, что эллиптическая фигура удовлетворяет равновесию массы однородной жидкости, что показал Маклорен с помощью очень красивого метода, из которого следует, что в этом случае возможно точное равновесие и что, если эллипсоид сжат очень мало, эллиптичность равна 5/4 отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе.

Одному и тому же вращательному движению соответствуют две различные фигуры равновесия, но равновесие не может существовать при любых таких движениях. Самая малая продолжительность одного оборота находящейся в равновесии однородной жидкости той же плотности, что и средняя плотность Земли, равна 0.1009 суток, и этот предел меняется обратно пропорционально квадратному корню из плотности. Когда вращение быстрее, жидкая масса сжимается с полюсов, что уменьшает продолжительность оборота до предела, требуемого состоянием ее равновесия.

После большого числа колебаний жидкость из-за трения и сопротивления, которые она испытывает, стабилизируется в этом единственном и определяемом начальным движением состоянии, и, каковы бы ни были начальные силы молекул, ось, проходящая через центр тяжести жидкой массы, по отношению к которой первоначальный момент сил был наибольшим, становится осью вращения.

Изложенные результаты дают простой способ проверки предположения об однородности Земли. Нерегулярность градусов измеренных меридианов оставляет слишком большую неуверенность в величине сжатия Земли, чтобы определить, удовлетворяет ли оно, хотя бы приблизительно, высказанному предположению. Но довольно правильное возрастание тяжести от экватора к полюсам может пролить свет на этот вопрос. Если принять за единицу тяжесть на экваторе, ее приращение на полюсе равно 0.00435 при условии, что Земля однородна. По наблюдениям маятников это приращение получается равным 0.0054. Следовательно, Земля — неоднородна. В самом деле, естественно думать, что плотность ее слоев увеличивается от поверхности к центру. Для устойчивости равновесия морей даже необходимо, чтобы их плотность была меньше средней плотности Земли. Иначе вода, движимая ветрами и другими причинами, часто выходила бы из своих пределов и затопляла бы континенты.

Поскольку однородность Земли исключается наблюдениями, для определения ее фигуры необходимо рассматривать море как бы покрывающим некоторое ядро, плотность слоев которого уменьшается от центра к поверхности. В своей прекрасной работе о фигуре Земли Клеро показал, что равновесие возможно также, если предположить эллиптическими фигуру ее поверхности и слоев ее внутреннего ядра. При наиболее вероятных предположениях о законах плотности и эллиптичности этих слоев сжатие Земли оказывается меньшим, чем в случае однородности, и большим, чем если бы сила тяжести была направлена в одну единственную точку. Возрастание тяжести от экватора к полюсам получается бо́льшим в первом случае, чем во втором. Но между полным приращением тяжести, взятой за единицу на экваторе, и эллиптичностью Земли существует замечательное соотношение. При любых гипотезах о структуре ядра, покрытого морем, насколько эллиптичность всей Земли меньше той, которая была бы в случае однородности, настолько же общее приращение тяжести больше того, которое было бы в этом же случае, и наоборот. Следовательно, сумма этого приращения и эллиптичности

всегда одинакова и равна пятикратной половине отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе, что для Земли составляет 1/115.2.

Если предположить, что слои земного сфероида имеют эллиптическую форму, возрастание его радиусов и силы тяжести, а также уменьшение градусов меридиана от полюсов к экватору пропорциональны квадрату косинуса широты и связаны с эллиптичностью Земли таким образом, что полное возрастание радиусов равно этой эллиптичности; полное уменьшение градусов равно эллиптичности, умноженной на утроенную величину градуса на экваторе; и полное возрастание силы тяжести равно силе тяжести на экваторе, умноженной на избыток 1/115.2 над этой эллиптичностью. Таким образом, можно определить эллиптичность Земли либо путем градусных измерений, либо по наблюдениям маятников. Совокупность этих наблюдений дает величину возрастания силы тяжести от экватора к полюсам, равную 0.0054. Вычитая эту величину из 1/115.2, получаем сжатие Земли равным 1/304.8. Если предположение об эллиптичности фигуры Земли соответствует природе вещей, это сжатие должно удовлетворять и градусным измерениям. Но оно, напротив, выявляет в них значительные погрешности, что вместе с трудностью приведения всех измерений к одному и тому же эллиптическому меридиану, по-видимому, указывает на то, что фигура Земли сложнее, чем думали раньше. Это не покажется удивительным, если принять во внимание неравномерность глубин морей, возвышение континентов и островов над их уровнем, высоту гор и неравномерность плотностей различных пород на поверхности этой планеты.

Чтобы наиболее полно охватить теорию фигуры Земли и планет, надо было бы определить притяжение сфероидов, мало отличающихся от сферы и образованных, следуя определенным законам, из переменных по форме и плотности слоев. Кроме того, надо было бы определить фигуру, соответствующую равновесию жидкости, покрывающей ее поверхность, так как необходимо представлять себе планеты покрытыми, как и Земля, находящейся в равновесии жидкостью, поскольку иначе их фигура была бы совершенно произвольной. Даламбер дал для этого хитроумный метод, применимый к большому числу разных случаев. Но этому методу не хватает той простоты, которая столь желательна в таких сложных изысканиях и составляет их главное достоинство. Одно замечательное уравнение в частных производных, относящееся к притяжению сфероидов, привело меня без помощи интегрирования, одним лишь дифференцированием, к общему выражению, которое дает радиусы сфероидов, притяжение ими любых точек, помещенных внутри них, на их поверхности или вне их, условия равновесия покрывающих их жидкостей, законы силы тяжести и изменения длины градусов меридиана на поверхности этих жидкостей. Все эти величины связаны между собой очень простыми соотношениями, в результате чего появляется возможность проверить предположения, которые можно сделать для представления как наблюденных изменений силы тяжести, так и градусных измерений меридиана. Бугер, желая представить градусные измерения в Лапландии, во Франции и на экваторе, предположил, что Земля яв-

ляется сфероидом вращения, у которого увеличение градусов меридиана от экватора к полюсам пропорционально четвертой степени синуса широты. Однако мы находим, что это предположение не может удовлетворить увеличению силы тяжести от экватора до Пелло, увеличению, которое по наблюдениям равно 0.0045 полной силы тяжести, но по этому предположению равнялось бы лишь 0.0027.

Выражения, о которых я говорил, дают прямое и общее решение проблемы, состоящей в определении фигуры равновесия жидкой массы, если предположить, что она вращается и состоит из бесконечного множества жидкостей любых плотностей, все молекулы которых притягиваются пропорционально массам и обратно пропорционально квадратам расстояний. Лежандр уже решил эту проблему очень остроумным анализом, предположив массу однородной. В общем случае жидкость обязательно принимает форму эллипсоида вращения, у которого все слои эллиптичны и уменьшаются по плотности, а эллиптичность возрастает от центра к поверхности. Границы сжатия всего эллипсоида лежат в пределах от 5/4 до 1/2 отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе. Первый предел относится к однородной массе, а второй — к тому случаю, когда слои, бесконечно близкие к центру, бесконечно плотны, и вся масса сфероида может рассматриваться собранной в этой точке. В этом последнем случае сила тяжести была бы обратно пропорциональна квадрату расстояния и направлена в эту единственную точку. Поэтому фигура Земли была бы такой, как мы определили выше. Но в общем случае линия, определяющая направление силы тяжести от центра к поверхности сфероида, представляет собой кривую, каждый элемент которой перпендикулярен к пересекаемому им слою.

Упомянутый мной анализ предполагает, что земной сфероид полностью покрыт морем. Но так как в действительности жидкость оставляет непокрытой значительную часть сфероида, этот анализ, несмотря на свой общий характер, не воспроизводит в точности природу, и необходимо изменить выводы, полученные при предположении о полном покрытии сфероида водой. Правда, в этом случае математическая теория фигуры Земли представляет большие затруднения, но прогресс анализа, особенно в этой части, дает средство преодолеть возникающие трудности и рассматривать континенты и моря такими, какими их дают наблюдения. Приближаясь таким путем к природе, можно понять причины многих важных явлений, известных нам из естественной истории и геологии, что может пролить яркий свет на эти две науки, присоединив их к теории системы мира. Вот главные результаты моего анализа. Одним из наиболее интересных является следующая теорема, неоспоримо устанавливающая неоднородность слоев земного сфероида:

*если к длине секундного маятника, определенной из наблюдений в какой-либо точке поверхности земного сфероида, прибавить произведение этой длины на половину высоты этой точки над уровнем океана, определенной с помощью барометра и разделенной на полярную полуось, возрастание исправленной таким образом длины от экватора к полюсам при предположении, что плотность Земли глубже некоторой незначительной*

*величины становится постоянной, будет равно произведению этой длины на экваторе на квадрат синуса широты и на 5/4 отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе,*[36] *или на 0.0043.*

Эта теорема, к которой меня привело дифференциальное уравнение первого порядка, действительное для поверхности однородных сфероидов, мало отличающихся от сферы, в общем случае справедлива, каковы бы ни были плотность моря и то, как оно покрывает часть суши. Она замечательна тем, что не предполагает известными ни фигуру земного сфероида, ни конфигурацию моря, т. е. фигур, которые невозможно было бы получить.

Опыты, произведенные в обоих полушариях с маятниками, согласуются в том, что коэффициент при квадрате синуса широты больше 0.0043 и очень близок к 0.0054 длины маятника на экваторе. Таким образом, эти опыты доказывают, что внутренность Земли неоднородна. Кроме того, из сравнения их с результатами анализа видно, что плотность земных слоев возрастает от поверхности к центру.

Правильность, с которой наблюденные длины секундных маятников следуют закону квадрата синуса широты, доказывает, что эти слои равномерно расположены вокруг центра тяжести Земли и форма их близка к эллипсоиду вращения.

Эллиптичность земного сфероида может быть определена измерением градусов меридиана. Но попарное сравнение различных измерений дает значительно различающиеся эллиптичности, так что изменение длины градуса не так точно следует закону квадрата синуса широты, как изменение силы тяжести. Это зависит от вторых производных земного радиуса, которые присутствуют в выражениях градуса меридиана и радиуса оскулирующей окружности, тогда как выражение силы тяжести содержит только первые производные этого радиуса, небольшие отклонения которого от радиуса эллипса возрастают при последовательных дифференцированиях. Однако если сравнить такие отдаленные друг от друга градусы, как градусы во Франции и на экваторе, их аномалии должны быть мало заметны в их разностях, и из этого сравнения мы находим, что эллиптичность земного сфероида равна 1/308.

Как мы уже видели, существует другой, более точный способ получения этой эллиптичности путем сравнения большого числа наблюдений с двумя лунными неравенствами, вызванными сжатием Земли: одним — по долготе и другим — по широте. Они согласуются между собой и дают величину сжатия земного сфероида, почти равную 1/305. Заслуживает внимания то обстоятельство, что каждое из двух неравенств приводит к этому результату, который, как мы видим, очень мало отличается от получаемого из сравнения градусных измерений во Франции и на экваторе.

Так как плотность моря составляет приблизительно лишь 1/5 средней плотности Земли, вода морей должна мало влиять на изменения градусов и силы тяжести, а также на два лунных неравенства, о которых я говорил. Ее влияние еще уменьшается незначительностью средней глубины моря, которая этим доказывается. Если представить себе земной

сфероид лишенным океана и предположить, что в этом состоянии его поверхность стала жидкой и пришла в равновесие, можно получить его эллиптичность, вычитая из пятикратной половины отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе полученный из опыта коэффициент при квадрате синуса широты в выражении длины секундного маятника, приняв его длину на экваторе за единицу.[37] Сжатие земного сфероида, полученное таким путем при пренебрежении небольшим влиянием действия моря на силу тяжести, равно 1/304.8. Малое отличие этого сжатия от тех величин, которые определяются из измерения земных градусов и лунных неравенств, доказывает, что поверхность этого сфероида была бы очень близкой к поверхности равновесия, если бы стала жидкой. Отсюда и из того, что море не покрывает большие континенты, можно заключить, что оно должно быть неглубоко и что его средняя глубина — того же порядка, что и средняя высота континентов и островов над его уровнем, которая не превышает 1000 м. Поэтому средняя глубина морей является лишь малой частью избытка экваториального радиуса над полярным, избытка, превосходящего 20 000 м. Подобно тому, как высокие горы покрывают некоторую часть континентов, в бассейнах морей могут существовать большие впадины. Однако естественно думать, что их глубина меньше, чем высота высоких гор, так как отложения рек и останки морских животных, увлекаемых течениями, со временем должны были их заполнить.

Эти выводы важны для естественной истории и геологии. Нельзя сомневаться в том, что море некогда покрывало большую часть наших континентов, на которых оно оставило неоспоримые следы своего пребывания. Различные явления, представляемые в наше время поверхностью и верхними пластами континентов, по-видимому, ясно указывают на оседание островов и части материков того времени и на последовавшие затем обширные опускания морских бассейнов, открывшие ранее затопленные участки. Чтобы объяснить эти оседания, достаточно предположить, что причины, вызвавшие их, обладали большей энергией, чем те, которые обусловили оседания, о которых история сохранила воспоминание. Оседание одной части морского бассейна открывает другую его часть, тем большую, чем мельче море. Поэтому из океана могли выйти большие континенты, не вызвав больших изменений в фигуре земного сфероида. Принадлежащее сфероиду свойство мало отличаться от того, который получился бы, если бы его поверхность стала жидкой, предусматривает, чтобы опускание уровня моря составляло лишь небольшую часть разности двух осей — экваториальной и полярной. Все гипотезы, основанные на значительных перемещениях полюсов по поверхности Земли, должны быть исключены, как несовместимые с упомянутым свойством. Это перемещение было придумано, чтобы объяснить существование слонов, ископаемые кости которых в изобилии находят в таких далеких северных странах, в которых современные слоны не могли бы жить. Но слон, которого с большой вероятностью предполагают современником последнего катаклизма и которого нашли во льду с хорошо сохранившимся мясом, имел кожу, покрытую густой шерстью.

Это доказывает, что такой вид слонов был хорошо защищен от холодов северных стран, в которых он мог обитать и даже к ним стремиться. Открытие этого животного подтвердило то, чему учит нас математическая теория Земли, а именно: при катаклизмах, изменивших поверхность Земли и уничтоживших многие виды животных и растений, фигура земного сфероида и положение его оси вращения на его поверхности испытали только слабые изменения.[38]

Какова же причина, придавшая слоям земного сфероида почти эллиптическую форму и увеличивающуюся от поверхности к центру плотность? Кто расположил их регулярно вокруг общего центра тяжести и кто придал поверхности сфероида форму, мало отличающуюся от той, которую он бы принял, если бы вначале был жидким? Если разные вещества, составляющие Землю, вначале под влиянием высокой температуры находились в жидком состоянии, то со временем более плотные из них должны были переместиться к центру. Все они приняли эллиптическую форму, а поверхность пришла в равновесное состояние. Затвердевая, эти слои лишь немного изменили свою форму, и теперь Земля должна обладать теми свойствами, о которых я говорил. Такое объяснение широко обсуждалось геометрами. Но Земля, однородная в химическом отношении или состоящая внутри из одного единственного вещества, также могла бы продемонстрировать нам такие явления. В самом деле, можно представить себе, что гигантский вес верхних слоев мог значительно увеличить плотность нижних. До сих пор геометры не вводили в свои изыскания, относящиеся к фигуре Земли, сжимаемость составляющих ее веществ, хотя Даниил Бернулли в своей работе о приливах и отливах морей уже указывал на это, как на причину увеличения плотности слоев земного сфероида. Анализ, который я применил к этому предмету в XI книге «Небесной механики», показал, что можно удовлетворить всем известным явлениям, предположив, что внутренность Земли образована из одного вещества. Так как закон распределения плотности, приобретаемой при давлении слоями этого вещества, неизвестен, можно в этом отношении высказать одни только гипотезы.

Известно, что плотность газов при неизменной температуре возрастает пропорционально их сжатию. Но этот закон не представляется пригодным для жидких и твердых тел. Естественно думать, что эти тела сопротивляются сжатию тем сильнее, чем больше они сжаты. Это подтверждается экспериментами, так что отношение дифференциала сжатия к дифференциалу плотности не постоянно, как у газа, а возрастает вместе с плотностью. Самое простое выражение этого переменного отношения дается произведением плотности на некоторую постоянную величину. Такой закон я принял потому, что он сочетает два достоинства: самым простым способом представляет то, что мы знаем о сжатии тел, и легко поддается вычислениям при изыскании фигуры Земли. В этих вычислениях я хотел только показать, что такой подход к рассмотрению внутреннего строения Земли может согласоваться со всеми явлениями, зависящими от этого строения, по крайней мере, если земной сфероид вначале был жидким. В твердом состоянии сцепление молекул очень

сильно уменьшает их взаимную сжимаемость, что помешало бы всей массе принять ту правильную фигуру, которую она имела бы в жидком состоянии, если бы вначале от нее отличалась. Поэтому как в этом предположении о строении Земли, так и при всех других возможных предположениях мне представляется необходимым считать, что вначале Земля была в жидком состоянии, на что указывают упорядоченное распределение силы тяжести и правильность фигуры ее поверхности.

Вся астрономия основана на неизменности положения оси вращения Земли на поверхности земного сфероида и на равномерности ее вращения. Период вращения Земли вокруг своей оси является эталоном времени. Поэтому очень важно уточнить влияние всех причин, которые могут изменить этот элемент. Земная ось движется вокруг полюсов эклиптики. Но с той эпохи, когда применение зрительной трубы в астрономических инструментах дало точный способ определения земных широт, в этих широтах не обнаружено никаких изменений, которые не могли бы быть приписаны погрешностям наблюдений. Это доказывает, что с этой эпохи ось вращения Земли проходила почти в точности через одни и те же точки земной поверхности, и поэтому представляется неизменной. Существование подобных осей в твердых телах известно с давних времен. Известно, что каждое из этих тел имеет три главные взаимно перпендикулярные оси, вокруг которых оно может равномерно вращаться, причем ось вращения остается неизменной. Но обладают ли другие тела, такие как Земля, покрытая частично жидкостью, этим замечательным свойством? Ведь в этом случае к условиям главных осей прибавляется еще условие равновесия жидкости. Оно меняет фигуру поверхности при изменении оси вращения. Поэтому необходимо знать, есть ли среди всех возможных изменений такое, при котором и ось вращения, и равновесие жидкости остаются неизменными. Анализ доказывает, что если очень близко от центра тяжести земного сфероида провести неподвижную ось, вокруг которой он может свободно вращаться, на поверхности этого сфероида море всегда сможет занять постоянное положение равновесия. В упомянутой мной одиннадцатой книге для определения этого состояния я дал метод приближения, расположенного по степеням отношения плотности моря к средней плотности Земли, отношения, которое, не превышая 1/5, делает приближение сходящимся. Изменчивость глубины моря и неправильность его очертаний не позволяют получить это приближение. Но достаточно только признать эту возможность, чтобы увериться в существовании равновесного состояния моря. Поскольку положение неподвижной оси вращения произвольно, естественно думать, что среди всех положений, которые можно ей придать, найдется одно такое, при котором она проходит через общий центр тяжести моря и покрываемого им сфероида таким образом, что если бы морская вода, придя в равновесие, замерзла в этом состоянии, эта ось стала бы главной осью вращения совокупности земного сфероида и моря. Ясно, что если вернуть замороженной массе ее текучесть, ось останется неизменной для всей Земли. Путем анализа я показал, что такая ось всегда возможна, и дал уравнения, определяющие ее положе-

ние. Применяя эти уравнения к случаю, когда море целиком покрывает сфероид, я пришел к следующей теореме:

*если вообразить плотность каждого слоя земного сфероида уменьшенной на величину плотности моря и если представить себе главную* ось *проходящей через центр тяжести этого воображаемого сфероида, то при вращении Земли вокруг этой оси море будет находиться в равновесии, а эта ось будет главной осью всей Земли в целом, центр тяжести которой будет центром тяжести воображаемого сфероида.*

Таким образом, море, только частично покрывающее земной сфероид, не только не делает невозможным существование главной оси, но еще благодаря своей подвижности и сопротивлению, которое испытывают его колебания, вернуло бы Земле состояние постоянного равновесия, если бы какие-нибудь причины его нарушили.

Если бы море было достаточно глубоко, чтобы покрыть всю поверхность земного сфероида, то если представить его вращающимся последовательно вокруг каждой из трех главных осей воображаемого сфероида, о котором мы говорили, каждая из этих осей была бы главной осью для всей Земли. Но устойчивость оси вращения имеет место, как и в твердом теле, только относительно двух главных осей, для которых момент инерции имеет максимум или минимум. Однако между твердым телом и Землей есть та разница, что при изменении оси вращения твердое тело не изменяет своей формы, тогда как поверхность моря при этом изменении принимает другую фигуру. Три фигуры, принимаемые этой поверхностью при вращении с одинаковой угловой скоростью последовательно вокруг каждой из трех осей вращения воображаемого сфероида, связаны между собой очень простыми соотношениями, которые я определил. Из моего анализа следует, что средний радиус трех поверхностей моря, соответствующих одной и той же точке поверхности земного сфероида, равен радиусу поверхности моря, находящегося в равновесии на этом сфероиде, полностью лишенном вращательного движения.

В V книге «Небесной механики» я рассмотрел вопрос о влиянии внутренних причин, таких, как вулканы, землетрясения, ветры, морские течения и т. д., на продолжительность вращения Земли и с помощью принципа площадей показал, что эти влияния неощутимы и заметное воздействие могло бы получиться только в том случае, если бы в силу этих причин значительные массы были перенесены на большие расстояния, чего не было в исторические времена. Но существует одна еще не рассмотренная внутренняя причина, изменяющая длину суток, которая ввиду важности этого элемента, заслуживает специального анализа. Эта причина состоит в нагретости земного сфероида.[39] Если, как все говорит о том, вся Земля вначале была жидкой, ее размеры уменьшались вслед за уменьшением температуры. Ее угловая скорость вращения постепенно увеличивалась и будет продолжать возрастать, пока Земля не придет в постоянное состояние, отвечающее средней температуре пространства, в котором она движется. Чтобы получить верное представление об увеличении этой угловой скорости, вообразим в пространстве с заданной температурой вращающийся шар из однородного

вещества, делающий один оборот вокруг своей оси за сутки. Если перенести этот шар в пространство, в котором температура меньше на один градус стоградусной шкалы, и если предположить, что его вращение не изменилось ни сопротивлением среды, ни трением, его размеры уменьшатся только от уменьшения температуры. И если с течением времени он примет температуру нового пространства, его радиус будет уменьшен на величину, которую я положил бы равной 0.00001, что приблизительно имеет место для стеклянного шара и что можно принять для Земли. Вес теплоты не был обнаружен ни в одном эксперименте, поставленном для его измерения. Поэтому представляется, что она, как и свет, не вносит никакого заметного изменения в массу тела. Таким образом, можно предположить, что в новом пространстве два фактора остаются неизменными, т. е. такими же, какими были в старом, именно, масса шара и отнесенная к плоскости его экватора сумма площадей, описанных за некоторое время каждой из его молекул. Молекулы приближаются к центру шара на 0.00001 их расстоянии от этого центра. Площади, описываемые ими в плоскости экватора, будут пропорциональны квадратам этих расстояний. Они уменьшились бы на величину, близкую к 1/50 000, если бы угловая скорость вращения не возросла. Отсюда следует, что для постоянства суммы площадей, описанных за данное время, должно произойти увеличение этой скорости и, следовательно, уменьшение продолжительности одного оборота на 1/50 000. Такое изменение будет окончательным. Но прежде чем прийти к своему окончательному состоянию, температура шара непрерывно уменьшается, причем более медленно в центре, чем на поверхности, так что путем наблюдения этого уменьшения и исходя из теории теплоты можно было бы определить эпоху, когда шар был перенесен в новую среду. Представляется, что Земля находится в подобном же состоянии. Это следует из термометрических измерений, сделанных в глубоких шахтах и указывающих на очень заметное возрастание теплоты по мере проникновения в глубь Земли. Среднее из наблюденных возрастаний температуры представляется равным одному градусу стоградусной шкалы при погружении на 32 м. Но очень большое число наблюдений позволит точно установить эту величину, которая может быть неодинаковой в разных странах.*

Чтобы получить увеличение скорости вращения Земли, было необходимо узнать закон уменьшения ее температуры от центра к поверхности. Я это сделал в XI книге «Небесной механики» для шара, нагретого вначале каким-либо способом и, сверх того, подвергаемого нагреванию

---

* Представим себе под обширным плато, на глубине 3000 м, большой резервуар, питаемый дождевой водой. На этой глубине она, нагреваясь от земного тепла, достигает температуры, близкой к температуре кипящей воды. Предположим теперь, что из-за давления прилегающих к ней столбов воды или пара, поднимающегося из резервуара, его вода поднимается до высоты основания упомянутого плато, откуда она стекает, образуя источник горячей воды, насыщенной растворимыми веществами тех слоев, через которые она протекла. Это дает правдоподобное объяснение происхождения термальных вод.

от внешней причины. Закон, о котором идет речь, я опубликовал в 1819 г. в сборнике «Connaissance des Temps». Пуассон затем подтвердил его научным анализом; этот закон представлен бесконечным рядом членов, имеющих коэффициентами последовательно убывающие постоянные величины, меньшие единицы, у которых показатели степени возрастают пропорционально времени. Таким образом, с течением времени эти члены один за другим исчезают, так что перед установлением окончательной температуры значимым остается только один из этих членов, который вызывает увеличение температуры внутри шара. Я предположил, что Земля уже пришла к этому состоянию, от которого она, может быть, еще очень далека. Но, желая дать лишь общее представление о влиянии уменьшения ее внутренней температуры на продолжительность суток, я принял эту гипотезу и вывел из нее приращение скорости вращения. Чтобы довести это приращение до численных значений, было необходимо определить значения двух произвольных постоянных, зависящих одна — от теплопроводности Земли, а другая — от повышения температуры ее поверхностного слоя над температурой окружающего его пространства. Первую из этих постоянных я определил с помощью изменений годичной температуры на разных глубинах и использовал для этого опыты г-на де Соссюра, изложенные в № 1422 его «Путешествия в Альпы». В этих исследованиях годичное изменение температуры на поверхности оказалось уменьшенным до 1/12 на глубине 9.6 м. Затем я предположил, что в наших шахтах возрастание температуры равно одному градусу стоградусной шкалы при углублении на 32 м и что линейное расширение земных слоев равно 0.00001 на один градус температуры. По этим данным я нахожу, что продолжительность суток не увеличилась даже на 0.005 десятичной секунды [$0.^{s}004$] за 2000 лет, что в основном зависит от большой величины земного радиуса.

Правда, я предполагал, что Земля однородна, а между тем неоспоримо, что плотность ее слоев возрастает от поверхности к центру. Но здесь следует заметить, что количество тепла и его движение были бы такими же в неоднородной среде, если в соответствующих частях обоих тел температура и теплопроводность были бы одинаковыми. В этом случае материя может рассматриваться как проводник тепла; передача тепла может быть одинаковой у веществ различной плотности. Иначе дело обстоит с динамическими свойствами, зависящими от масс молекул. Итак, в этом кратком очерке действия земного тепла на продолжительность суток мы можем распространить на неоднородную Землю данные о тепле, относящиеся к однородной Земле. Таким путем находим, что возрастание плотности слоев земного сфероида уменьшает влияние тепла на продолжительность суток, влияние, которое со времен Гиппарха не увеличило эту продолжительность и на 1/300 с [$0.^{s}003$].

Член, от которого зависит возрастание внутренней температуры Земли, не прибавляет в наше время даже 1/5° к средней температуре ее поверхности. Его исчезновение, которое должно произойти через много веков, не будет причиной исчезновения каких-либо видов живущих в настоящее время организмов, во всяком случае до тех пор, пока солнечное

тепло или расстояние Солнца от Земли не испытают заметных изменений.

Впрочем, я далек от мысли, что изложенные выше предположения обязательно соответствуют природе. Прежде всего, наблюденные величины двух упомянутых выше постоянных зависят от свойств почвы, которые в том, что относится к теплоте, в разных странах различны. Но краткий очерк, сделанный мной, достаточен, чтобы видеть, что наблюденные явления, относящиеся к теплоте Земли, могут быть согласованы с результатом, который я вывел из сравнения теории вековых неравенств Луны с древними наблюдениями затмений, а именно, что со времен Гиппарха продолжительность суток не изменилась на 0.01 с [$0.^{s}009$].

Но каково отношение средней плотности Земли к известной плотности вещества на ее поверхности? Влияние притяжения гор на колебания маятника и на направление нити отвеса может привести нас к решению этой интересной проблемы. Правда, самые высокие горы все же очень малы по сравнению с Землей. Но мы можем очень приблизиться к центру их действия, и это вместе с высокой точностью современных наблюдений должно сделать достаточно ощутимым их влияние. Очень высокие горы в Перу казались подходящими для этой цели. Бугер не пренебрег столь важным наблюдением во время своего путешествия, предпринятого для измерения градуса меридиана на экваторе. Но так как эти большие горы — вулканические и пустые внутри, влияние их притяжения оказалось значительно меньше, чем можно было ожидать исходя из их величины. Все же оно было заметно. Без влияния притяжения горы уменьшение силы тяжести на вершине г. Пичинча должно было бы быть 0.00149, а наблюдения дали лишь 0.00118. Отклонение нити отвеса под влиянием притяжения другой горы превысило $20^{cc}$ [$6.5''$]. Позднее Маскелайн с исключительной точностью измерил подобное отклонение, вызванное влиянием горы в Шотландии. Из его измерения следует, что средняя плотность Земли приблизительно вдвое больше, чем плотность горы, и в четыре или пять раз больше плотности обыкновенной воды. Эти любопытные наблюдения заслуживают того, чтобы быть повторенными на разных горах, внутреннее строение которых хорошо известно. Кавендиш определил эту плотность из притяжения двух больших металлических шаров; с помощью весьма остроумного способа ему удалось сделать это притяжение заметным. Из его опытов получилось, что отношение средней плотности Земли к плотности воды весьма близко к 11/2, что с предыдущим отношением согласуется настолько хорошо, насколько можно ожидать от таких тонких исследований.*

Я представлю здесь некоторые соображения о приведении наблюдений к уровню моря. Вообразим вокруг Земли очень разреженный и везде одинаково плотный флюид, который возвышается над ней очень мало, однако настолько, чтобы покрыть самые высокие горы. Такой

---

* По новейшим данным, средняя плотность Земли равна 5.52, что почти совпадает с приводимой Лапласом (Ред.).

была бы наша атмосфера, приведенная к ее средней плотности. Анализ показывает, что соответствующие точки двух поверхностей — моря и этого флюида — разделены всюду одинаковым интервалом. Мысленно продолжая поверхность моря под континентами и под поверхностью упомянутой среды таким образом, чтобы обе поверхности были везде разделены этим интервалом, мы получим то, что я назвал *уровнем моря.* Эллиптичность этих двух поверхностей определяется градусными измерениями. Кроме того, изменение силы тяжести на поверхности упомянутого флюида, прибавленное к эллиптичности этой поверхности, дает постоянную сумму, равную 5/2 отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе. Следовательно, к этой поверхности или к поверхности моря, продолженной так, как мы указали, надо относить измерения градусов и периода качания маятников, произведенные на континентах. Легко доказать, что сила тяжести изменяется заметным образом при переходе от точки на континенте к соответствующей точке на поверхности воображаемого флюида только в зависимости от расстояния между этими точками, если уклон в сторону моря незначителен. Поэтому при приведении длины маятника к уровню моря надо принимать во внимание только высоту точки наблюдения над определенным нами уровнем. Чтобы проиллюстрировать это результатами вычисления в одном из случаев, который я подверг анализу,* представим себе, что Земля есть эллипсоид вращения, частично покрытый морем, плотность которого мы предположим очень малой по сравнению со средней плотностью Земли. Если эллиптичность земного сфероида меньше той, которая соответствует равновесию его поверхности, предполагаемой жидкой, море покроет экваториальную зону до некоторой определенной широты. Градусы, измеренные на континентах и увеличенные в отношении их расстояний от поверхности предполагаемого флюида, если принять за единицу земной радиус, будут теми, которые мы измерили бы на этой поверхности. Длина секундного маятника, уменьшенная на удвоенную величину этого отношения, была бы той, которую мы наблюдали бы на этой самой поверхности, и эллиптичность, определенная градусными измерениями, была бы той же, какую мы получили бы, вычитая из 5/2 отношения центробежной силы к силе тяжести на экваторе избыток силы тяжести на полюсе над силой тяжести на экваторе, принятой за единицу.

Применим эту теорию к Юпитеру. Центробежная сила, вызванная вращением этой планеты, очень близка к 1/12 силы тяжести на экваторе, по крайней мере, если принять расстояние четвертого спутника от центра Юпитера таким, какое приведено во второй книге. Если бы Юпитер был однороден, мы получили бы диаметр его экватора, прибавив к его малой оси, взятой за единицу, 5/4 предыдущей дроби. Тогда две его оси относились бы как 10 к 9.06. Однако наблюдения дают иное отношение: 10 к 9.43. Следовательно, Юпитер неоднороден. Если предположить, что он состоит из слоев с убывающей от центра к поверхности плотно-

* «Traité de Mécanique céleste», livre XI.

стью, его эллиптичность должна заключаться между 1/24 и 5/48. Наблюдаемая эллиптичность, находясь в этих пределах, доказывает нам неоднородность его слоев и, по аналогии, неоднородность слоев земного сфероида, уже замеченную благодаря маятниковым измерениям и подтвержденную лунными неравенствами, зависящими от сжатия Земли.

## Глава IX

## О ФИГУРЕ КОЛЬЦА САТУРНА

Как было показано в первой книге, кольцо Сатурна составлено из двух концентрических колец очень малой толщины.

Каков механизм, удерживающий эти кольца вокруг планеты? Невероятно, что это происходит вследствие простого сцепления их молекул, так как при этом предположении их части, близкие к Сатурну и увлекаемые все время возобновляемым действием силы тяжести, с течением времени должны были бы оторваться от колец, которые, незаметно деградируя, разрушились бы и окончили свое существование так же, как все создания природы, не имевшие достаточных сил для сопротивления воздействию посторонних причин. Следовательно, эти кольца поддерживаются без усилия только по законам равновесия. Но для этого надо предположить, что они вращаются вокруг оси, перпендикулярной их плоскости и проходящей через центр Сатурна, так что сила тяжести, направленная к планете, уравновешивается центробежной силой этого движения.

Вообразим однородный флюид, окружающий Сатурн в виде кольца, и посмотрим, какова должна быть его фигура, чтобы он оставался в равновесии под воздействием взаимного притяжения своих молекул, силы тяжести, направленной к Сатурну, и центробежной силы. Если через центр планеты провести плоскость, перпендикулярную поверхности кольца, его сечение этой плоскостью представит собой то, что я называю *образующей кривой*. Анализ показывает, что если ширина кольца незначительна по сравнению с его расстоянием до центра Сатурна, равновесие флюида возможно, когда образующая кривая есть эллипс, большая ось которого направлена к центру планеты. Время обращения кольца почти такое же, как время обращения спутника, движущегося по круговой орбите на расстоянии, равном расстоянию до центра образующего эллипса, и это время для внутреннего кольца равно приблизительно $4^1/_3$ ч [$10.^h4$]. Гершель подтвердил наблюдениями этот вывод, к которому меня привела теория тяготения.

Равновесие жидкости также существовало бы, если предположить, что образующий эллипс изменяется по величине и положению в пределах окружности кольца, лишь бы эти изменения были заметны только на значительно бóльших расстояниях, чем ось образующего сечения. Таким образом, можно предположить, что кольцо имеет неодинаковую ширину в разных своих частях. Можно даже считать, что оно имеет двоякую

кривизну. На эти неравенства указывают появления и исчезновения кольца Сатурна, при которых две стороны кольца представлялись разными. Неравенства даже необходимы, чтобы поддерживать кольцо в равновесии вокруг планеты, так как если бы оно было совершенно одинаковым во всех своих частях, его равновесие нарушалось бы самой незначительной силой, такой, как притяжение спутника; и кольцо упало бы на планету.

Из сказанного следует, что кольца, окружающие Сатурн, представляют собой неправильные твердые тела неодинаковой ширины в разных точках своей окружности, так что их центры тяжести не совпадают с их геометрическими центрами. Эти центры тяжести можно рассматривать как центры тяжести спутников, движущихся вокруг центра Сатурна на расстояниях, зависящих от неравенства колец с угловыми скоростями, равными скоростям вращения соответствующих им колец.

Можно представить себе, что эти кольца в силу их взаимного воздействия, влияния Солнца и спутников Сатурна должны колебаться вокруг центра этой планеты и производить таким образом световые явления с периодом, охватывающим несколько лет. Можно было бы думать, что эти кольца, подчиняясь различным силам, должны были бы выйти из их общей плоскости. Но так как Сатурн имеет быстрое вращение, причем плоскость его экватора совпадает с плоскостью кольца и первых шести спутников, его действие удерживает в этой плоскости систему из всех этих тел. Влияния Солнца и седьмого спутника изменяют лишь положение плоскости экватора Сатурна, который в своем движении увлекает кольца и орбиты шести первых спутников.[40]

## Глава X

### ОБ АТМОСФЕРАХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Разреженный, прозрачный, сжимаемый и упругий газ, окружающий тело и опирающийся на него, называется *атмосферой*. Вокруг каждого небесного тела мы представляем себе такую атмосферу, существование которой, вероятное для них всех, для Солнца и Юпитера указывается наблюдениями.[41] По мере того как атмосфера возвышается над телом, она становится все разреженнее в силу своей упругости, которая расширяет ее тем более, чем она меньше сжата. Но если бы ее внешние части были упругими, она расширялась бы беспрерывно и, наконец, рассеялась бы в пространстве. Поэтому необходимо, чтобы упругость атмосферы уменьшалась быстрее, чем вес, который ее сжимает, и чтобы существовало такое состояние разреженности, в котором она не была бы упругой. Именно в таком состоянии этот газ должен находиться на поверхности атмосферы.

Все слои атмосферы с течением времени должны прийти во вращательное движение, общее с вращением тел, которые они окружают, потому что их взаимное трение и трение о поверхность тел должно уско-

рять наиболее медленные движения и замедлять быстрые до тех пор, пока между ними не установится полное равенство. В этих изменениях и, вообще, во всех, которые испытывает атмосфера, сумма произведений молекул тела и его атмосферы, умноженных, соответственно, на площади, описанные вокруг общего центра тяжести их радиусами-векторами, спроектированными на плоскость экватора, всегда остается неизменной за одинаковые отрезки времени. Таким образом, если предположить, что по какой-либо причине атмосфера сжалась или что часть ее сконденсировалась на поверхности тела, его вращательное движение вместе с движением атмосферы окажется ускоренным, так как радиусы-векторы площадей, описанных молекулами изначальной атмосферы, при этом уменьшаются; и сумма произведений всех молекул на соответствующие площади не может не измениться, если только скорость вращения не увеличится.

На внешней поверхности атмосферы газ удерживается только своей тяжестью, и фигура этой поверхности такова, что равнодействующая центробежной силы и силы притяжения тела ей перпендикулярна. Атмосфера сплюснута у полюсов и вздута на экваторе, но эта сплюснутость имеет предел, и максимальное отношение полярной и экваториальной осей равно $^2/_3$.

На экваторе атмосфера может распространяться только до той точки, где центробежная сила в точности уравновешивает силу тяжести, так как ясно, что за этим пределом газ должен рассеяться. У Солнца эта точка удалена от центра на величину радиуса орбиты планеты, которая имела бы период обращения, равный времени вращения Солнца. Поэтому солнечная атмосфера не распространяется до орбиты Меркурия, и, следовательно, не она производит зодиакальный свет, который кажется распространяющимся даже за пределы земной орбиты. Впрочем, эта атмосфера, у которой полярная ось должна быть, по меньшей мере, равна двум третям ее экваториальной оси, очень далека от линзообразной формы, какую по наблюдениям имеет зодиакальный свет.

Точка, в которой центробежная сила уравновешивает силу тяжести, тем ближе к телу, чем больше скорость его вращения. Если представить себе, что атмосфера, распространившись до этой точки, затем сжимается и конденсируется от охлаждения на поверхности тела, его вращательное движение станет быстрее и дальняя граница распространения атмосферы будет непрерывно приближаться к его центру. Поэтому атмосфера постепенно оставит в плоскости экватора газообразные зоны, которые будут продолжать вращение вокруг тела, так как их центробежная сила равна их тяжести. Но поскольку у молекул атмосферы, отдаленных от экватора, такого равенства не будет, они не перестанут ей принадлежать. Очень вероятно, что кольца Сатурна и представляют такие зоны, оставленные его атмосферой.

Если вокруг рассматриваемого нами тела обращаются другие тела или оно само обращается вокруг другого тела, границей его атмосферы будет точка, где центробежная сила вместе с притяжением посторонних тел точно уравновешивает ее вес. Так, границей атмосферы Луны будет та

точка, где центробежная сила, вызванная ее вращением, вместе с силой притяжения Земли уравновешивается притяжением нашего спутника. Так как масса Луны равна $^1/_{75}$ массы Земли, эта точка удалена от центра Луны приблизительно на $^1/_9$ расстояния от Луны до Земли. Если бы на этом расстоянии первоначальная атмосфера Луны не была лишена своей упругости, она унеслась бы к Земле, которая могла бы, таким образом, ее поглотить. В этом, может быть, заключается причина, почему лунная атмосфера так мало заметна.

## Глава XI

## О ПРИЛИВАХ И ОТЛИВАХ МОРЯ

Ньютон первым дал правильную теорию морских приливов и отливов, связав ее со своим великим законом всемирного тяготения. Кеплер хорошо распознал стремление морских вод к центрам Солнца и Луны, но, не зная закона этого стремления и методов, необходимых для его вычисления, он по этому предмету смог дать только очень правдоподобный, но краткий очерк. Галилей в своих «Диалогах о системе мира» выражает удивление и сожаление о том, что это описание, которое, как ему казалось, возрождает в натуральной философии оккультные воззрения древних, было представлено таким человеком, как Кеплер. Он объяснял морские приливы и отливы суточными изменениями, которые вращение Земли, складываясь с ее обращением вокруг Солнца, производит в абсолютном движении каждой молекулы моря. Его объяснение казалось ему настолько неопровержимым, что он дал его как одно из главных доказательств системы Коперника, защита которой навлекла на него столько гонений. Последующие открытия подтвердили суждение Кеплера и отвергли объяснения Галилея, как противоречащие законам равновесия и движения жидкостей.

Теория Ньютона появилась в 1687 г. в его работе «Математические начала натуральной философии». Он рассматривает море как жидкость той же плотности, что и Земля; эта жидкость целиком покрывает ее и в каждый момент, под действием Солнца, принимает фигуру, соответствующую равновесию. Полагая затем, что эта фигура есть эллипсоид вращения, большая ось которого направлена к Солнцу, он определяет отношение двух его осей тем же способом, который дал ему отношение осей Земли, сжатой центробежной силой ее вращательного движения. Поскольку большая ось водяного эллипсоида всегда направлена к Солнцу, когда оно находится у экватора, самая большая высота моря, т. е. полная вода в каждом порту, должна быть в полдень и в полночь, а наибольшее понижение — во время восхода и захода этого светила.

Рассмотрим, каким образом Солнце возмущает равновесие моря. Ясно, что если бы Солнце с одинаковыми и параллельными силами воздействовало на центр тяжести Земли и на все молекулы моря, вся система земного сфероида и покрывающего его моря подчинялась бы этим силам

общим движением, и равновесие воды не было бы нарушено. Следовательно, это равновесие нарушается только разностью этих сил и различием их направлений. Молекула моря, находящаяся под Солнцем, сильнее притягивается к нему, чем центр Земли. Поэтому она стремится отделиться от ее поверхности, но удерживается силой тяжести, которая уменьшается этим стремлением. Через половину суток эта молекула находится в противостоянии с Солнцем, которое в этом случае притягивает ее слабее, чем центр Земли. Поэтому поверхность земного шара стремится от нее отделиться, но притяжение молекулы удерживает ее на поверхности. Таким образом, эта сила опять уменьшается солнечным притяжением, и легко убедиться, что поскольку расстояние от Солнца до Земли очень велико по сравнению с радиусом Земли, уменьшения силы тяжести в обоих этих случаях приблизительно равны. Простого разложения действия Солнца па молекулу морской воды достаточно, чтобы показать, что во всех других положениях этого светила по отношению к этим молекулам его действие, возмущающее их равновесие, повторяется через половину суток.

Закон, следуя которому море поднимается и опускается, можно выразить следующим образом.

Вообразим вертикальный круг, окружность которого представляет половину суток, а диаметр равен полному приливу, т. е. разности высот полной и малой воды. Предположим, что дуги этой окружности, начиная от самой низкой части, выражают время, протекшее от момента малой воды. Синусы-верзусы этих дуг будут высотами воды, соответствующими этим временам. Таким образом, море, поднимаясь, за равное время омывает одинаковые дуги этой окружности.

Чем обширнее море, тем заметнее должны быть явления приливов. В жидкой массе воздействия, получаемые каждой молекулой, передаются полностью всей массе, и поэтому влияние Солнца, ничтожное для каждой отдельной молекулы, производит на океан заметное действие. Вообразим на дне моря изогнутый канал, один конец которого оканчивается над его поверхностью вертикальной трубой, продолжение которой проходит через центр Солнца. Вода поднимается в этой трубе под непосредственным воздействием Солнца, которое уменьшает вес молекул, и, особенно, из-за давления заключенных в канале молекул, которые все вместе делают усилие, чтобы собраться под Солнцем. Подъем воды в трубе, выше естественного уровня моря, есть интеграл этих бесконечно малых усилий. Если длина канала возрастет, этот интеграл будет больше, так как он охватит большее расстояние, а также большей будет разность в направлении и величине сил, которыми будут приведены в движение крайние молекулы. Из этого примера видно, как влияет протяженность моря на приливные явления, и ясна причина, по которой приливы и отливы неощутимы в малых морях, таких как Черное или Каспийское.

Величина приливов очень зависит от местных условий. Колебания моря, зажатого в проливе, могут стать очень большими. Отражения воды

от противоположных берегов могут их еще больше увеличить. Вот почему приливы, обычно очень небольшие на островах в Южном океане,* очень велики в наших портах.

Если бы океан полностью покрывал сфероид вращения и если бы он не испытывал при своих движениях никакого сопротивления, момент полной воды соответствовал бы прохождению Солнца через верхний или нижний меридиан. Но в природе это не так, и местные обстоятельства очень сильно изменяют время приливов даже в близких между собою портах. Чтобы получить верное представление об этих различиях, представим себе широкий канал, сообщающийся с морем и углубляющийся очень далеко в сушу. Ясно, что приливное движение, происходящее у его устья, последовательно передается по всей его длине так, что фигура его поверхности будет образована рядом больших движущихся волн, которые непрерывно возобновляются и пробегают расстояние, равное их длине за половину суток. Эти волны произвели бы в каждой точке канала приливы и отливы, следующие изложенным выше законам. Но время этих приливов будет запаздывать по мере удаления этих точек от устья канала. То, что мы говорили о канале, может быть применено и к рекам, поверхность которых поднимается и опускается подобными же волнами, несмотря на встречное течение их вод. Такие волны наблюдаются во всех реках около их устьев. В больших реках они проникают очень далеко. Так, например, около ущелья Поксиза на реке Амазонке в 800 км от моря, они еще заметны. Действие Луны на море производит эллипсоид, подобный производимому Солнцем. Но он вытянут больше, так как ее действие сильнее. Незначительность эксцентриситета этих эллипсоидов позволяет рассматривать их как бы наложенными один на другой так, чтобы радиус поверхности моря равнялся полусумме соответствующих радиусов их поверхностей.

Отсюда возникают главные вариации морских приливов и отливов. В сизигиях две большие оси эллипсоидов совпадают, и самая полная вода наступает в полночь и в полдень, а самая малая — во время восхода и захода Солнца и Луны. В квадратурах большая ось лунного эллипсоида совпадает с малой осью солнечного. Поэтому полная вода имеет место во время восхода и захода светил, и в это время — она самая малая из полных вод. В полночь и в полдень наступает малая вода, и она — самая большая из малых вод. Поэтому, выражая действие каждого светила через разность полуосей соответствующего эллипсоида, которая, очевидно, пропорциональна этому действию, видим, что, если порт расположен на экваторе, избыток самого высокого сизигийного прилива над самым низким сизигийным отливом будет выражать сумму влияния Солнца и Луны. А избыток самого высокого квадратурного прилива над самым низким квадратурным отливом даст разность этих влияний. Если

* Под именем Южного ледовитого океана подразумевали обыкновенно пространство, ограниченное со всех сторон южным полярным кругом и простирающееся от этого круга к южному полюсу до пределов южно-полярного материка. (Прим. перев.).

порт не на экваторе, надо умножить эти избытки на квадрат косинуса широты этого порта. Таким образом, по наблюдениям высоты сизигийных и квадратурных приливов можно определить отношение влияния Луны и Солнца. Ньютон из нескольких наблюдений, сделанных в Бристоле, сделал вывод, что это отношение равно $4^1/_2$ к 1. Расстояния светил от центра Земли влияют на приливы, причем действие каждого светила обратно пропорционально кубу расстояния.

Что касается промежутка времени между приливами от одного дня к другому, то Ньютон замечает, что этот промежуток короче всего в сизигиях; затем он растет от сизигии до следующей квадратуры; в первом октанте [дуге в 45°] он равен лунным суткам и в квадратуре имеет максимум, после чего уменьшается. В следующем октанте он снова становится равен лунным суткам и наконец в сизигии он опять минимален. Его средняя величина равна лунным суткам, так что бывает столько же приливов, сколько верхних и нижних прохождений Луны через меридиан.

Таковы были бы, по теории Ньютона, явления приливов, если бы Солнце и Луна двигались в плоскости экватора. Но наблюдения показывают, что самая полная вода наступает не в самый момент сизигий, а на 3/2 суток позже. Ньютон приписывал это запаздывание колебаниям уровня моря, которые продолжались бы еще некоторое время, если бы влияние светил прекратилось. Точная теория колебания моря, производимого этим влиянием, показывает, что если бы не было побочных обстоятельств, самые высокие приливы совпадали бы с сизигиями, а самые малые — с квадратурами. Таким образом, их запаздывание относительно моментов этих фаз не может быть приписано причине, указанной Ньютоном. Оно зависит, так же как и время полной воды в каждом порту, от побочных обстоятельств. Этот пример показывает нам, как надо остерегаться даже самых правдоподобных суждений, если они не проверены строгим анализом.

Однако рассмотрение двух эллипсоидов, наложенных один на другой, все же дает представление о приливах, если направить большую ось солнечного эллипсоида к воображаемому Солнцу, всегда одинаково удаленному от истинного. Большая ось лунного эллипсоида подобным же образом должна быть направлена к воображаемой Луне, всегда одинаково удаленной от настоящей Луны на такое расстояние, что соединение двух воображаемых светил происходит только через сутки с половиной после сизигии.

Такое представление посредством двух эллипсоидов, распространенное на случай, когда светила движутся по орбитам, наклоненным к экватору, не может быть согласовано с наблюдениями.

Если порт расположен на экваторе, то вблизи максимума приливов оно дает два полных прилива — утренний и вечерний, почти одинаковой величины, каковы бы ни были склонения светил. Лишь действие каждого светила уменьшается в отношении квадрата косинуса его склонения к единице. Но если порт находится на некоторой широте, не равной нулю, эти два полных прилива могли бы быть очень различными,

и когда склонение светил равно наклонности эклиптики, вечерний прилив в Бресте был бы приблизительно в 8 раз больше чем утренний. Однако многочисленные наблюдения, сделанные в этом порту, показывают, что и в этом случае эти два прилива почти одинаковы, и их самая большая разность не превышает тридцатой части их суммы. Ньютон приписывает малость этой разности той же причине, которой он объяснял запаздывание самой большой воды в момент сизигии, а именно, колебательным движениям моря, которые, по его мнению, перенося большую часть вечернего прилива на следующий утренний прилив, делают эти приливы почти одинаковыми. Но теория колебаний моря показывает, что и это объяснение неточно, и что без дополнительных обстоятельств, два последовательных прилива были бы равны только в случае, если бы море везде было одинаковой глубины.

В 1738 г. Академия наук предложила исследование причины приливов и отливов моря в качестве темы на соискание премии по математике, которую и присудила в 1740 г. Были премированы четыре работы. Три первые, основанные на принципе всемирного тяготения, были присуждены Даниилу Бернулли, Эйлеру и Маклорену. Иезуит Кавальери, автор четвертой работы, принял систему вихрей. Это была последняя честь, отданная этой системе Академией наук, которая в то время пополнялась молодыми геометрами, удачные работы которых должны были внести большой вклад в прогресс небесной механики.

Три работы, основанные на законе всемирного тяготения, являются развитием теории Ньютона. Они опираются не только на этот закон, но еще на гипотезу, принятую этим великим геометром, о том, что море в каждый момент принимает фигуру, при которой оно находится в равновесии под притягивающим его светилом.

Работа Бернулли содержит наиболее точные разложения. Он, как и Ньютон, приписывает запаздывание максимальных и минимальных приливов по отношению к моментам сизигий и квадратур инерции морской воды и добавляет к этому, что, может быть, часть этого запаздывания зависит от времени, затрачиваемого действием Луны, чтобы достигнуть Земли. Но я установил, что всемирное тяготение передается между небесными телами со скоростью, которая если и не бесконечна, то превосходит в несколько миллионов раз скорость света, а известно, что свет от Луны достигает Земли меньше, чем за две секунды.

Даламбер в своем трактате о главной причине ветров, который получил в 1746 г. премию Прусской Академии наук, рассмотрел колебания атмосферы, вызванные притяжением Солнца и Луны. Предполагая, что Земля лишена вращательного движения, рассмотрение которого он считал бесполезным в своих исследованиях, и полагая плотность атмосферы везде одинаковой и подверженной притяжению неподвижного небесного светила, он определил колебания этого газа. Но когда он захотел рассмотреть случай с движущимся светилом, трудность проблемы заставила его прибегнуть для ее упрощения к порочным гипотезам, так что полученные результаты нельзя рассматривать даже как приближение. Из его

формул получается постоянство ветра с востока на запад, но интенсивность его зависит от первоначального состояния атмосферы. А так как величины, зависящие от этого состояния, давно должны были исчезнуть под влиянием всех причин, которые восстановили бы равновесие атмосферы, если бы действие светил прекратилось, нельзя таким путем объяснить пассатные ветры. Трактат Даламбера замечателен своими решениями некоторых проблем интегрального исчисления в частных производных, решениями, которые годом позже он столь удачно применил к движению вибрирующих струн.

Таким образом, вопрос о движении жидкостей, покрывающих планеты, был почти совершенно новым, когда в 1772 г. я к нему обратился. Опираясь на недавние открытия в области исчисления в частных производных и в теории движения жидкостей, открытий, в которых Даламбер принимал большое участие, я опубликовал в мемуарах Академии наук за 1775 г. дифференциальные уравнения движения жидкостей, которые, покрывая Землю, притягиваются Солнцем и Луной. Сперва я приложил эти уравнения к задаче, которую безуспешно пытался разрешить Даламбер, задаче о колебаниях жидкости, покрывающей Землю, предполагаемую сферичной и лишенной вращения, считая, что притягивающее светило движется вокруг этой планеты. Я дал общее решение этой задачи для произвольных плотности и начального состояния этой жидкости, предположив, что каждая молекула жидкости испытывает сопротивление, пропорциональное ее скорости. Это позволило мне выяснить, что начальные условия движения уничтожаются с течением времени из-за трения и некоторой небольшой вязкости жидкости. Но рассмотрение дифференциальных уравнений вскоре позволило обнаружить необходимость учитывать и вращательное движение Земли. Поэтому я рассмотрел это движение и постарался специально определить колебания жидкости, единственно устойчивые и независимые от ее первоначального состояния. Эти колебания бывают трех родов. Колебания первого рода независимы от вращения Земли, и их определение не представляет больших трудностей. Колебания, зависящие от вращения Земли, период которых около суток, относятся ко второму роду. Наконец, третий род колебаний состоит из колебаний с периодом, близким к полусуточному. В наших портах они значительно превышают другие колебания. Я точно определил эти различные колебания в случаях, когда это было возможно, и путем хорошо сходящихся приближений — в остальных случаях. Разность двух последовательных полных приливов во время солнцестояний зависит от колебаний второго рода. Эта разность, очень мало заметная в Бресте, была бы очень велика по теории Ньютона. Этот великий геометр и его последователи, как я уже говорил, приписывали расхождение между их формулами и наблюдениями инерции морских вод. Но анализ показал мне, что оно зависит от распределения глубин моря. Поэтому я искал такой закон, который сводит это расхождение к нулю, и нашел, что для этого глубина моря должна быть постоянной. Предположив затем, что Земля имеет эллиптическую форму, которая и морям придает подобную же эллиптическую фигуру равновесия, я дал общее выражение неравенствам

второго рода. При этом я пришел к тому замечательному заключению, что движения земной оси оказываются такими же, как если бы море составило вместе с Землей одну твердую массу, что противоречило мнению геометров, особенно Даламбера, который в своей важной работе о предварении равноденствий заявил, что текучесть морей лишила их всякого влияния на это явление. Сделанный мной анализ дал, кроме того, главное условие устойчивости равновесия моря. Геометры, рассматривая равновесие жидкости, покрывающей эллиптический сфероид, заметили, что если немного сжать его фигуру, жидкость стремится вернуться к своему первоначальному состоянию только в том случае, если отношение ее плотности к плотности сфероида меньше 5/3, и это условие они сделали условием устойчивости равновесия жидкости. Но в этом исследовании недостаточно рассмотреть только состояние покоя жидкости, очень близкое к равновесию. Надо еще предположить, что она имела какое-либо очень малое первоначальное движение, и определить условие, необходимое для того, чтобы это движение все время оставалось в узких пределах. Рассматривая проблему с этой общей точки зрения, я нашел, что если средняя плотность Земли превышает среднюю плотность моря, эта жидкость, выведенная по какой-либо причине из состояния равновесия, никогда не отклонится от него больше, чем на очень малую величину; но эти отклонения могли бы быть очень большими, если бы упомянутое выше условие не было выполнено. Наконец, я определил колебания атмосферы, покрывающей океан, и нашел, что притяжения Солнца и Луны не могут вызывать ее постоянное движение с востока на запад, наблюдаемое под названием пассатных ветров. Колебания атмосферы производят в высоте барометра маленькие изменения, размах которых на экваторе равен половине миллиметра. Эти колебания заслуживают внимания наблюдателей.

Предыдущие исследования, хотя и очень общие, еще далеко не воспроизводят наблюдения приливов в наших портах. Они предполагают, что поверхность земного сфероида имеет правильную форму и полностью покрыта морем. Но очевидно, что большие неправильности этой поверхности должны значительно изменять движение вод, которыми она покрыта только частично. В самом деле, опыт показывает, что побочные обстоятельства вносят сильные изменения в высоту и время приливов, даже в очень близко расположенных портах. Эти изменения невозможно подвергнуть расчету, так как обстоятельства, от которых они зависят, нам неизвестны. Даже если бы они и были известны, исключительная трудность проблемы воспрепятствовала бы ее разрешению. Впрочем, среди многочисленных модификаций движения моря, зависящих от этих обстоятельств, это движение сохраняет с силами, которые его производят, соотношения, указывающие на природу этих сил и подтверждающие закон притяжения моря Солнцем и Луной. Исследование этих соотношений между причинами и их действием не менее полезно в натуральной философии, чем прямое решение проблем, как для проверки существования этих причин, так и для определения законов их действия. Часто такое исследование можно с успехом использовать, и оно, подобно

исчислению вероятностей, счастливо восполняет наше незнание и недостатки человеческого ума.

В данном вопросе я исходил из следующего принципа, который может быть полезен и в других случаях:

*«состояние системы тел, в котором начальные условия движения исчезли из-за сопротивления, испытываемого этим движением, является периодическим, как те силы, которые движут эту систему»*.

Отсюда я заключил, что если море подвержено действию периодической силы, выраженной через косинус угла, возрастающего пропорционально времени, возникает частичный прилив, выраженный косинусом угла, возрастающего таким же образом, но у которого постоянная под знаком косинуса и коэффициент при этом косинусе в силу побочных обстоятельств могут быть очень отличными от аналогичных постоянных в выражении силы и могут определяться только из наблюдений. Выражение действия Солнца и Луны на море может быть развернуто в сходящийся ряд подобных косинусов. Отсюда рождается столько же частичных приливов, которые по принципу сосуществования малых колебаний складываются вместе, чтобы образовать суммарный прилив, наблюдаемый нами в порту. С такой точки зрения я рассмотрел приливы в четвертой книге «Небесной механики». Чтобы связать между собой различные постоянные частичных приливов, я рассматривал каждый прилив как результат действия одного светила, равномерно движущегося в плоскости экватора. Приливы с периодами, близкими к полусуткам, происходят от действия светил, собственное движение которых очень медленно в сравнении с вращательным движением Земли. А так как угол косинуса, выражающего действие одного из этих светил, кратен вращению Земли [суткам] плюс или минус кратное собственного движения [период обращения] светила и, кроме того, постоянные косинусов, выражающих прилив, зависящий от двух светил, имели бы такое же отношение к постоянным косинусов, выражающих их действие, если бы их собственные движения были одинаковы, я предположил, что для разных светил отношения изменяются пропорционально разности их собственных движений. Ошибка этой гипотезы, если она существует, не имеет заметного влияния на главные результаты моих вычислений.

Самые большие изменения высоты приливов в наших портах происходят от действия Солнца и Луны; мы предполагаем, что они равномерно движутся по своим орбитам, всегда на одном и том же расстоянии от Земли. Но чтобы получить закон, выражающий эти изменения, надо так комбинировать наблюдения, чтобы все другие изменения исключались из результата. Это получается, если рассматривать превышения полной воды над соседней малой водой во время сизигий или квадратур, взятые в равном числе около каждого равноденствия и каждого солнцестояния. Таким приемом исключаются приливы, не зависящие от вращения Земли, приливы, период которых близок к суткам, а также те, которые вызываются изменениями расстояния Солнца от Земли. Рассматривая три последовательные сизигии или квадратуры и удваивая промежуточную сизигию, мы исключаем приливы, произведенные изме-

нениями расстояния Луны, потому что, если это светило находится в одной из фаз в перигее, оно окажется почти в апогее в другой такой же фазе, причем компенсация будет тем более точной, чем больше число использованных наблюдений. При такой обработке влияние ветра на результаты наблюдений становится близким к нулю, так как если ветер поднимает высоту одного прилива, он почти настолько же поднимает и соседний отлив, и его действие исключается из разности этих высот. Комбинируя наблюдения таким образом, чтобы в их совокупности был представлен один единственный элемент, мы последовательно определяем все элементы явления. Теория вероятностей дает для определения этих элементов еще более надежный метод, который можно назвать *наивыгоднейшим методом*. Он состоит в составлении стольких условных уравнений, связывающих элементы, сколько имеется наблюдений. По правилам этой теории число уравнений сводят к числу этих элементов, определяемых затем в решении редуцированной таким образом системы уравнений. По такому способу Бувар построил свои великолепные таблицы Юпитера, Сатурна и Урана. Но поскольку наблюдения приливов далеки от точности астрономических наблюдений, требуется очень большое число наблюдений приливов, чтобы их ошибки компенсировались; это не позволяет применить к ним наивыгоднейший метод.

По просьбе Академии наук в Брестском порту в начале прошлого века проводились наблюдения приливов последовательно в течение шести лет. С этими наблюдениями, опубликованными Лаландом, я и сравнил в указанной мной книге свои формулы. Расположение этого порта очень благоприятно для наблюдений такого рода. Он построен в глубине широкого канала, которым соединяется с морем. Неправильности движения моря доходят до него сильно ослабленными, подобно тому, как колебания ртути в барометре, вызванные неравномерностью движения судна, ослабляются сужением в трубке этого прибора. Кроме того, поскольку в Бресте приливы значительны, случайная часть их изменений составляет лишь небольшую долю. Поэтому в наблюдениях этих приливов, если хоть немного увеличить их число, отмечают большую правильность, не нарушаемую небольшой речкой, теряющейся на огромном рейде этого порта. Пораженный этой правильностью, я предложил правительству распорядиться, чтобы в Бресте провели новый ряд наблюдений приливов продолжительностью, по меньшей мере, в течение периода движения узлов лунной орбиты, что и было сделано. Эти новые наблюдения начались с 1 июня 1806 г. и с тех пор продолжаются каждый день без перерывов.

Были обработаны наблюдения 1807 г. и 15 последующих лет. Я обязан неутомимому усердию Бувара за все огромные вычисления, которые потребовались для сравнения моего анализа с наблюдениями и которые представляют интерес для астрономии. Он использовал около 6000 наблюдений. Чтобы получить высоты полной воды и их изменения вблизи максимума и минимума, пропорциональные квадрату времени, были рассмотрены около каждого равноденствия и каждого солнцестояния по три последовательные сизигии, между которыми заключалось равноден-

ствие или солнцестояние. Результаты промежуточной сизигии были удвоены, чтобы исключить влияние лунного параллакса. Для каждой сизигии было взято превышение высоты полной вечерней воды над малой утренней водой в день перед сизигией, в самый день сизигии и в четыре следующих за ней дня, так как максимум прилива попадает приблизительно на середину этого интервала. Наблюдения этих высот, сделанные в течение дня, являются более надежными и точными. Для каждого года из 16 лет была составлена сумма высот в соответствующие дни равноденственных сизигий и подобные же суммы, относящиеся к сизигиям солнцестояний; далее выведены максимумы высоты полной воды около сизигий как равноденственных, так и в периоды солнцестояний, и изменения этих высот вблизи их максимумов. Рассмотрение этих высот и их изменений доказывает правильность наблюдений такого рода в порту Бреста.

В квадратурах применялся подобный же метод с той лишь разницей, что брался избыток утренней полной воды над малой вечерней водой в день квадратуры и три следующих за нею дня. Так как возрастание квадратурных приливов от их минимума гораздо быстрее, чем их уменьшение в сизигиях от максимума, закон пропорциональности изменений квадрату времени пришлось ограничить меньшим интервалом.

Все полученные высоты с очевидностью показывают влияние склонения Солнца и Луны не только на абсолютные высоты приливов, но также и на их изменения. Многие ученые, особенно Лаланд, подвергали сомнению существование этого влияния, поскольку вместо того, чтобы рассматривать большую совокупность наблюдений, они исходили из нескольких изолированных наблюдений, в которых уровень воды по случайным причинам поднимался до большой высоты во время солнцестояний. Но применение самого простого исчисления вероятностей к результатам Бувара достаточно, чтобы увидеть, что вероятность влияния склонения светил огромна и гораздо больше, чем вероятность большого числа фактов, не вызывающих никаких сомнений.

Из изменений приливов вблизи их максимумов и минимумов были выведены промежутки, отделяющие эти максимумы и минимумы от сизигий и квадратур, причем они получились очень близкими к полутора суткам, что находится в полном согласии с результатами обработки древних наблюдений, опубликованными в IV книге «Небесной механики». Такое же согласие имеет место как для экстремальных величин приливов, так и для изменений высоты приливов относительно этих величин; таким образом, через целый век природа оказалась подобной самой себе. Промежуток, о котором я говорил, зависит от постоянных, заключенных под знаками косинусов в выражениях главных приливов, вызванных действием Солнца и Луны. Соответствующие константы выражения сил различным образом изменены побочными обстоятельствами. В момент сизигии лунный прилив предшествует солнечному, и только через полуторасуточный интервал этот прилив, запаздывая каждый день относительно солнечного, приходит с ним в совпадение, и они вместе вызывают максимальные приливы. Можно составить себе правильное

представление о запаздывании наиболее высоких приливов относительно момента сизигии, если представить себе в плоскости меридиана канал, у входа в который самый высокий прилив наступает в момент сизигии и затрачивает 3/2 суток, чтобы дойти до порта, расположенного на другом конце этого канала. Подобные же модификации имеют место в константах, на которые умножаются косинусы, что в результате увеличивает влияние светил на море. В IV книге «Небесной механики» я описал способ определения этого увеличения, которое из прежних наблюдений оказалось равным 1/10. Но хотя в этом отношении наблюдения квадратурных приливов согласуются с наблюдениями сизигийных, я сказал бы, что для определения такого трудно определяемого элемента требуется гораздо больше наблюдений. Вычисления Бувара подтвердили существование этого увеличения и для Луны дали его близким к одной четверти. Определение этого отношения необходимо, чтобы из наблюдения приливов вывести истинные отношения действия Солнца и Луны, от которых зависят явления предварения равнодействий и нутация земной оси. Отделив влияние светил на море от преувеличений, вызванных побочными обстоятельствами, находим значение нутации в шестидесятеричных секундах равным 9.″4; лунного уравнения в солнечных таблицах — равным 6.″8 и массу Луны — равной 1/75 массы Земли.[42] Эти результаты очень близки к тем, которые дает дискуссия астрономических наблюдений. Согласие величин, полученных столь различными методами, весьма примечательно.

Из сравнения максимумов и минимумов наблюденных высот приливов с моими формулами были определены воздействия Солнца и Луны на море и приращения этих воздействий. Изменения высот приливов около экстремальных точек являются их необходимым следствием. Поэтому, подставляя величины этих воздействий в мои формулы, мы должны вновь найти почти те же наблюденные изменения, что действительно и было найдено. Это согласие является убедительным подтверждением закона всемирного тяготения. Он получает еще новое подтверждение из наблюдений сизигийных приливов близ апогея и перигея Луны. В упомянутой работе я рассмотрел только разности высот приливов при этих двух положениях Луны. Здесь я рассматриваю, кроме того, изменения этих высот после их максимумов, и для этих двух точек мои формулы согласуются с наблюдениями. Часы приливов и их запаздывания от одного дня к другому меняются так же, как их высоты. По ним Бувар составил таблицы приливов, которые он использовал для определения высот. В них явственно видно влияние склонений светил и лунного параллакса. Эти наблюдения при сравнении с моими формулами дают такое же согласие, как и наблюдения высот приливов. Небольшие расхождения, которые еще обнаруживаются при этих сравнениях, можно было бы устранить, если лучше определить постоянные каждого частного прилива. Принцип, использованный мной для связи между собой этих различных постоянных, может быть не вполне точен. Возможно еще, что величины, которыми мы пренебрегаем, применяя принцип сосуществования колебаний, становятся заметными в больших

приливах. Здесь я ограничусь упоминанием этих небольших аномалий с целью направить тех, кто захочет вновь предпринять такие вычисления, когда наблюдения приливов, продолжающиеся в Бресте и хранящиеся в Королевской обсерватории, будут достаточно многочисленны, чтобы получить уверенность, что эти аномалии не являются следствием погрешностей наблюдений. Но прежде чем видоизменять примененные мной принципы, надо будет дальше развить аналитические приближения.

Наконец, я рассмотрел прилив, период которого близок к суткам. Сравнивая последовательно разности двух полных и двух малых вод в большом числе сизигий солнцестояния, я определил величину этого прилива и время его максимума в Бресте. Я нашел, что его величина близка к 1/5 части метра и что время, на которое он опережает момент полной воды полусуточного прилива в Бресте, равно приблизительно 1/10 части суток. Хотя его величина не достигает даже 1/30 полусуточного прилива, силы, порождающие эти два прилива, почти равны, что показывает, каким различным образом побочные причины влияют на величину приливов. Это не будет удивительным, если принять во внимание, что даже в случае, если бы поверхность Земли была правильной и полностью покрытой морем, суточный прилив исчез бы, если бы глубина его была постоянна.

Побочные обстоятельства могут также уничтожить в порту полусуточное неравенство и сделать очень заметными суточные. В этом случае каждые сутки бывает только один прилив, исчезающий, когда светила находятся на экваторе. Это наблюдалось в Батшаме, порту Тонкинского королевства и на некоторых островах Южного моря.

Что касается этих побочных обстоятельств, то я заметил, что одни из них распространяются на все моря и определяются причинами, иногда очень удаленными от порта наблюдения. Например, нельзя сомневаться в том, что колебания Атлантического и Южного океанов, отражаясь от восточного берега Америки, растянувшейся почти от одного полюса до другого, имеют большое влияние на приливы в порту Бреста. От этих обстоятельств главным образом зависят почти одинаковые явления в наших портах. Таким представляется запаздывание наиболее высокой воды по отношению к моменту сизигии. Другие обстоятельства — более близкие к порту соседние берега или проливы — производят различия, наблюдаемые в высотах и временах приливов в близко расположенных между собой портах. Отсюда следует, что частичный прилив не связан с широтой порта отношением, определяемым производящей его силой, поскольку он зависит от подобных же приливов, соответствующих весьма отдаленным широтам и даже другому полушарию. Поэтому нельзя иначе, как путем наблюдений, определить знак и величину этого прилива.

Особенности приливов, о которых я говорил, зависят от членов разложения в ряд действия небесных светил, разделенных на куб их расстояний до Земли, — единственных членов, которые я рассматривал до сих пор. Но Луна достаточно близка к Земле, чтобы члены, выражающие ее действие, разделенные на четвертую степень ее расстояния, были за-

метны в результатах, полученных из большого числа наблюдений, так как из теории вероятностей известно, что число наблюдений восполняет недостаток точности и позволяет узнать неравенства, значительно меньшие, чем ошибка каждого наблюдения. По этой теории можно даже указать, какое число наблюдений надо сделать, чтобы достигнуть большой вероятности того, что ошибка полученного результата заключена в заданных пределах. Поэтому я думал, что влияние членов, зависящих от Луны и деленных на четвертую степень расстояния ее от Земли, могло выявиться в совокупности большого количества наблюдений, обработанных Буваром. Приливные движения, зависящие от членов, деленных на куб расстояния, не дают никакой разницы между приливами новолуний и полнолуний. Но те члены, которые имеют делителем четвертую степень расстояния, вносят разницу в эти приливы. Они создают прилив, период которого приблизительно равен одной трети суток. Рассмотрение наблюдений с этой точки зрения показывает с большой вероятностью существование такого частичного прилива. Оно также с несомненностью устанавливает, что действие Луны, поднимающей воду в Бресте, больше, когда ее склонение — южное, чем когда оно северное; это может происходить только из-за действия лунных членов, разделенных на четвертую степень расстояний.

Из сказанного видно, что исследование общих отношений между явлением приливов и воздействием Солнца и Луны на море, к счастью, восполняет невозможность интегрирования дифференциальных уравнений этого движения и незнание нами данных, необходимых для определения произвольных функций, входящих в их интегралы. В результате мы получаем полную уверенность в том, что в соответствии с законом всемирного тяготения единственной причиной этих явлений является притяжение этих двух светил.

Если бы Земля не имела спутника и ее орбита была круговой и расположенной в плоскости экватора, то чтобы обнаружить действие Солнца на океан, мы бы имели всегда один и тот же час полной воды и закон, по которому она поднимается. Но влияние Луны, складываясь с действием Солнца, создает в приливах изменения, зависящие от ее фаз, согласие которых с наблюдениями увеличивает достоверность теории тяготения. Все неравенства движения, склонения и расстояния этих двух светил порождают множество явлений, обнаруженных наблюдениями и делающих эту теорию неуязвимой; так, существование причины доказывается разнообразием ее действий. Воздействие Солнца и Луны на море, как необходимое следствие всемирного тяготения, указываемого всеми небесными явлениями, непосредственно подтверждается явлениями приливов, в чем не приходится сомневаться. Теперь оно настолько очевидно, что в этом вопросе существует единодушное согласие между учеными, знакомыми с этими явлениями и достаточно искушенными в геометрии и механике, чтобы понять его связь с законом тяготения. Длинный ряд наблюдений, еще более точных, чем те, которые уже сделаны, исправит уже известные элементы, установит величины тех из них, которые вызывают сомнения, и откроет явления,

скрытые до сих пор в погрешностях наблюдений. Приливы не менее интересны для изучения, чем неравенства небесных движений. В течение долгого времени их не изучали с достаточной точностью из-за тех неправильностей, которые в них имеются. Но эти неправильности исчезают при увеличении числа наблюдений. В Бресте, положение которого особенно благоприятно для наблюдения этих явлений, это число даже не должно быть очень большим. Мне остается рассказать о методе определения времени прилива в какой-либо день. Каждый из наших портов можно рассматривать для этой цели находящимся в конце канала, в устье которого частичные приливы приходят точно в самый момент прохождения светил через меридиан и затрачивают 3/2 суток, чтобы дойти до его конца; предполагается, что порт лежит восточнее устья на некоторое число часов, которое я называю *основным часом порта.* Его легко вывести из прикладного часа, учитывая, что этот последний есть час прилива, совпадающего с сизигией. Так как в это время запаздывание прилива ото дня ко дню равно 2705 с [$2337^s$], за 3/2 суток оно составит 3951 с [$3414^s$]. Эту величину надо прибавить к прикладному часу, чтобы получить основной час. Теперь, если увеличить время приливов у устья на 15 часов плюс основной час, мы получим момент соответствующего прилива в порту. Таким образом, проблема сводится к определению моментов прилива в некотором месте, долгота которого известна, при условии, что частные приливы происходят в моменты прохождения светил через меридиан. Анализ дает для этого очень простые и легко табулируемые формулы.

Большие приливы часто производили в портах и на берегах большие бедствия, которые можно было бы предупредить, если бы о высоте прилива было известно заранее. Ветры могут иметь значительное влияние на эти явления, однако их невозможно предвидеть. Но можно с уверенностью предсказать влияние Солнца и Луны, и этого чаще всего достаточно, чтобы уберечься от несчастий, которые могут произвести высокие приливы, если к обычным причинам прилива присоединится действие ветра. Чтобы морские департаменты могли пользоваться этими достижениями науки, Бюро долгот каждый год в своих эфемеридах публикует таблицу сизигийных приливов, принимая за единицу их среднюю высоту в сизигиях во время равноденствий.

Я так подробно остановился на приливах и отливах моря, потому что из всех эффектов притяжения небесных тел они ближе всего к нам и больше всего заметны. Помимо этого, они казались мне особенно удобными, чтобы показать, как из большого числа даже не очень точных наблюдений можно узнать и определить законы и причины явлений, для которых невозможно получить аналитические выражения путем составления и интегрирования их дифференциальных уравнений. Таковы действия солнечного тепла на атмосферу при возникновении пассатных ветров и муссонов и на регулярные суточные и годичные изменения в показаниях барометров и термометров.

## Глава XII

### ОБ УСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСИЯ МОРЕЙ

Некоторые нерегулярные причины, такие, как ветры и землетрясения, волнуют море, поднимают его на большую высоту и иногда выводят его из границ. Однако наблюдения показывают, что оно стремится вновь принять состояние равновесия и что различные виды трения и сопротивления скоро возвращают его к равновесию без воздействия Солнца и Луны. Это стремление создает *прочное*, или *устойчивое* равновесие, о котором мы говорили в книге третьей. Мы видели, что равновесие системы тел может быть абсолютным, т. е. сохраняться, каковы бы ни были небольшие испытываемые им нарушения. Оно также может быть относительным и зависеть от природы первичного потрясения. Какого же рода устойчивость равновесия морей? Наблюдения не могут нам на это уверенно ответить, так как, хотя среди почти бесконечного разнообразия колебаний, испытываемых океаном под воздействием нерегулярных причин, он и представляется всегда стремящимся к состоянию равновесия, все же можно опасаться, что какая-нибудь необыкновенная причина сообщит ему колебание, вначале незначительное, но которое, все больше и больше возрастая, поднимет его выше самых высоких гор; это объяснило бы некоторые явления естественной истории. Поэтому интересно найти условия, необходимые для абсолютной устойчивости равновесия морей, и исследовать, имеют ли место эти условия в природе. Подвергнув этот предмет анализу, я убедился, что равновесие океана стабильно, если его плотность меньше, чем средняя плотность Земли; это очень вероятно, так как естественно думать, что ее слои тем плотнее, чем они ближе к центру. Мы уже видели, что это подтверждается измерениями маятников и градусов меридианов и наблюденным притяжением гор. Итак, море находится в состоянии устойчивого равновесия, и если, в чем трудно сомневаться, оно когда-то покрывало континенты, сегодня высоко поднявшиеся над его уровнем, причину этого надо искать не в недостаточной устойчивости его равновесия. Анализ показал мне еще, что эта устойчивость перестала бы существовать, если бы средняя плотность моря превзошла плотность Земли, так что устойчивость океана и избыток плотности земного шара над плотностью покрывающей его воды взаимно связаны между собой.

## Глава XIII

### О КОЛЕБАНИЯХ АТМОСФЕРЫ

Чтобы достичь океана, действие Солнца и Луны проникает сквозь атмосферу, которая поэтому испытывает их влияние и подчиняется движениям, подобным движениям моря. Это порождает периодические изменения в показаниях барометра и периодические по силе и направле-

нию ветры. Эти ветры очень незначительны и мало заметны в очень неспокойной атмосфере. Амплитуда колебаний барометра — меньше 1 мм даже на экваторе, где она самая большая.

В IV книге «Небесной механики» я дал теорию всех этих изменений и обратил на них внимание наблюдателей. Представляется, что лучше всего наблюдать изменения показаний барометра на экваторе. Там они имеют не только наибольшую величину, но и наименьшие отклонения, вызванные нерегулярными причинами. Однако, подобно тому, как побочные обстоятельства значительно увеличивают высоты приливов в наших портах, они могут таким же образом увеличивать и колебания атмосферы, а также соответствующие им колебания показаний барометра, в чем интересно убедиться путем наблюдений.

Атмосферный прилив происходит по трем причинам. Первая из них — это непосредственное действие Солнца и Луны на атмосферу; вторая — периодическое поднятие и опускание океана, подвижного основания атмосферы, и, наконец, третья — притяжение этого газа морем, фигура которого периодически изменяется. Так как эти три причины вытекают из тех же сил притяжения Солнца и Луны, в соответствии с принципом, на котором я обосновал свою теорию приливов, они, как и их действия, имеют те же периоды, что и эти силы. Поэтому атмосферные приливы подчинены тем же законам, что и приливы в океане. Они также являются сочетанием двух частичных приливов, производимых один — действием Солнца, а другой — Луны. Период солнечного атмосферного прилива равен солнечным полусуткам, а лунного прилива — лунным полусуткам. Поскольку в Бресте действие Луны на море в три раза больше солнечного, лунный атмосферный прилив, по крайней мере, в два раза больше солнечного прилива. Этими соображениями мы должны руководствоваться при выборе наблюдений, пригодных для определения таких малых величин и способа их комбинирования, чтобы наиболее полно исключить влияние причин, производящих большие изменения показаний барометра.

В течение многих лет в Королевской обсерватории каждый день наблюдают высоту барометра и показание термометра в 9 (шестидесятеричных) ч утра, в полдень, в 3 ч пополудни и в 9 ч вечера. Эти наблюдения, сделанные при помощи одних и тех же инструментов и почти все одним и тем же наблюдателем, благодаря их точности и количеству, очень пригодны для определения атмосферных приливов, если они ощутимы. Суточные изменения показаний барометра в результатах этих наблюдений ясно заметны. Достаточно одного месяца наблюдений, чтобы их обнаружить. Избыток наибольшей наблюденной высоты барометра, который приходится на 9 ч утра, над самой малой высотой, приходящейся на 3 ч дня в Париже, равен 0.8 мм. Это — среднее значение, полученное из ежедневных наблюдений, производившихся в течение шести последовательных лет.

Изменение высоты барометра, вызванное солнечным приливом, ежедневно повторяющееся в один и тот же час и смешивающееся с суточным колебанием, которое оно видоизменяет, не может быть определено

из наблюдений, сделанных в Королевской обсерватории. Иначе обстоит дело с изменением высоты барометра, вызванным лунным приливом. Оно зависит от лунного времени и повторяется по величине в те же часы солнечного времени, только с полумесячными интервалами. Поэтому сравнения наблюдений, о которых я говорил, сделанные пополумесячно, лучше всего подходят, чтобы выявить лунные приливы. Например, если максимум этого прилива придется на 9 ч утра в день сизигии, его минимум наступит около 3 ч дня. Обратное будет в день квадратуры. Поэтому в первом случае этот прилив увеличит суточную вариацию первого из этих дней и уменьшит суточную вариацию второго. Разность этих вариаций будет равна двойной величине лунного атмосферного прилива. Но если максимум этого прилива не приходится на 9 ч утра в сизигиях, то чтобы определить величину и время его наступления, надо использовать барометрические наблюдения, сделанные в 9 ч утра, в полдень и в 3 ч дня, каждый день как в сизигиях, так и в квадратурах. Можно воспользоваться наблюдениями, проведенными в предшествующие этим фазам или следующие за ними дни, отдаленные на одинаковое число дней, и, таким образом, использовать для определения этих, столь трудно определимых элементов все наблюдения года.

Здесь надо сделать важное замечание, без которого было бы невозможно выделить такую малую величину, как лунный атмосферный прилив, из множества больших вариаций показаний барометра. Чем ближе наблюдения расположены друг к другу, тем меньше заметно действие этих вариаций. Оно почти равно нулю в результатах, полученных в один день за короткий промежуток времени в шесть часов. Показания барометра почти всегда изменяются достаточно медленно, чтобы заметным образом не нарушить действие регулярных причин. Вот почему средний результат суточных вариаций каждого года всегда почти одинаков, несмотря на то, что абсолютные средние высоты барометра в разные годы различаются на несколько миллиметров. Таким образом, если бы сравнить среднюю высоту в 9 ч утра одного года со средней годовой высотой в 3 ч дня другого года, часто можно было бы получить очень ошибочное суточное изменение, иногда даже со знаком, противоположным истинному. Поэтому, определяя очень малые величины, важно выводить их из наблюдений, сделанных в тот же день, и брать среднее из большого числа полученных таким образом величин. Следовательно, нельзя определить лунный прилив иначе, как из системы наблюдений, проводившихся ежедневно, по крайней мере, в три разных срока, в соответствии с системой, принятой в обсерватории.

Г-н Бувар был настолько любезен, что выделил из своих записей барометрические наблюдения, относящиеся к самому дню каждой сизигии и каждой квадратуры, а также ко дню, предшествовавшему этим фазам, и первым и вторым дням, следующим за ними. Они охватывают восемь лет, прошедших с 1 октября 1815 г. до 1 октября 1823 г. Я использовал наблюдения, сделанные в 9 ч утра, в полдень и в 3 ч дня. Наблюдения, сделанные в 9 ч вечера, я не рассматривал, чтобы уменьшить, насколько это возможно, интервал наблюдений. К тому же на-

блюдения, сделанные в эти первых три срока, делались более точно в установленное время, чем вечерние наблюдения; так как барометр в эти часы освещался дневным светом, разность в отсчете, зависящая от различного способа освещения инструментов, исчезает. Сравнивая результаты этих многочисленных наблюдений, которые охватывают 1584 дня, с моими формулами, я получил величину лунного атмосферного прилива, равную 1/18 мм, и момент его вечернего максимума — три часа с третью в день сизигии.

Здесь особенно дает себя знать необходимость использовать очень большое число наблюдений, комбинировать их наиболее выгодным образом и иметь метод для определения вероятности того, что ошибка полученного результата заключена в узких пределах, — метод, без которого следствия случайных причин ошибочно можно представить как закон природы, что часто случается в метеорологии. Я дал такой метод в моей «Аналитической теории вероятностей». Прилагая его к наблюдениям, я определил закон аномалий суточных вариаций показаний барометра и пришел к выводу, что нельзя без некоторой натяжки приписать изложенные выше результаты одним этим аномалиям. Вероятно, что лунный атмосферный прилив уменьшает суточную вариацию в сизигии и увеличивает ее в квадратурах, но в таких пределах, что этот прилив не изменяет высоту барометра даже на 1/18 мм в ту или иную сторону; это показывает, сколь мало заметно действие Луны на атмосферу в Париже. Хотя эти результаты выведены из 4752 наблюдений, метод, о котором я говорил, позволяет увидеть, что для придания им достаточной вероятности и получения с точностью такого малого элемента, как лунный атмосферный прилив, нужно использовать, по меньшей мере, 40 000 наблюдений. Одно из главных преимуществ этого метода заключается в том, что он показывает, до каких пределов надо увеличивать число наблюдений, чтобы не оставалось никакого разумного сомнения в их результатах.

Из закона аномалий суточной вариации показаний барометра, к которому я пришел, следует, что существует вероятность, равная 1/2, или один против одного, что суточная вариация между 9 и 3 ч дня в среднем за каждый 30-дневный месяц всегда будет положительна в течение 75 последовательных месяцев. Я попросил г-на Бувара проверить, получилось ли это для каждого из 72 месяцев шести лет, протекших с 1 января 1817 г. по 1 января 1823 г., из которых он вывел среднюю суточную вариацию, равную 0.801 мм. Он нашел наиболее вероятный результат, а именно, что средняя вариация за каждый месяц всегда была положительна.

Каково влияние на лунный прилив, соответственно, трех причин атмосферных приливов, о которых я говорил? Трудно ответить на этот вопрос. Однако малая плотность моря по сравнению со средней плотностью Земли не позволяет приписать заметного влияния изменению его фигуры. Без побочных обстоятельств влияние прямого действия Луны было бы нечувствительно в наших широтах. Эти обстоятельства, в самом деле, сильно влияют на высоту приливов в наших портах. Но по-

скольку атмосферный газ покрывает Землю гораздо правильнее, чем море, их влияние на атмосферные приливы должно быть значительно меньше, чем на прилив океана. Эти соображения побуждают меня считать главной причиной лунных атмосферных приливов в наших странах периодические поднятия и опускания моря. Барометрические наблюдения, проводимые ежедневно в портах, где приливы поднимаются на большую высоту, осветили бы это любопытное метеорологическое явление.

Мы заметим здесь, что притяжение Солнца и Луны не производит ни в море, ни в атмосфере никакого постоянного движения с востока на запад. То движение воздуха, которое наблюдают между тропиками, называемое *пассатом*, имеет другую причину. Вот наиболее вероятная.

Солнце, которое мы для большей простоты предположим находящимся в плоскости экватора, своим теплом разрежает столбы воздуха и поднимает их выше истинного уровня. Под действием своего веса они должны опуститься и двинуться к полюсам в верхней части атмосферы. Но одновременно в ее нижней части новый приток холодного воздуха, приходящий из стран, расположенных вблизи полюсов, замещает тот, который был разрежен на экваторе. Таким образом, устанавливаются два противоположных воздушных потока: один — в нижней части атмосферы, а другой — в верхней. Но реальная скорость воздуха, вызванная вращением Земли, тем меньше, чем он ближе к полюсу. Поэтому, перемещаясь к экватору, он должен вращаться медленнее, чем соответствующие части Земли; тела, расположенные на ее поверхности, должны ударять его из-за избытка своей скорости и вследствие противодействия воздуха испытывать сопротивление в направлении, обратном их вращательному движению. Поэтому для наблюдателя, считающего себя неподвижным, воздух кажется дующим в сторону, обратную вращению Земли, т. е. с востока на запад, а это и есть направление пассатов.

Если рассмотреть все причины, нарушающие равновесие атмосферы: ее большую подвижность, вызываемую ее текучестью и упругостью, влияние холода и тепла на ее упругость, огромное количество паров, которые попеременно то ее насыщают, то осаждаются, наконец, производимые вращением Земли изменения в относительных скоростях молекул атмосферы вследствие одного только их перемещения в направлении меридианов, не приходится удивляться многообразию ее движений, которые очень трудно подчинить каким-либо законам.

## Глава XIV

## О ПРЕДВАРЕНИИ РАВНОДЕНСТВИЙ И О НУТАЦИИ ЗЕМНОЙ ОСИ

Все связано в природе, и общие законы соединяют между собой, казалось бы, самые разрозненные явления. Так, вращение земного сфероида сжимает его у полюсов, и это сжатие, сочетаясь с действием Солнца и Луны, порождает предварение равноденствий, которое до открытия все-

мирного тяготения казалось не имеющим никакого отношения к суточному движению Земли.

Вообразим себе, что эта планета представляет собой однородный сфероид, вздутый на экваторе. Тогда ее можно рассматривать как состоящую из сферы с диаметром, равным полярной оси, и покрывающего эту сферу мениска, наибольшая толщина которого приходится на экватор сфероида. Молекулы этого мениска можно рассматривать как множество малых лун, тесно прилегающих друг к другу и совершающих свое обращение за время, равное периоду вращения Земли. Узлы всех их орбит должны отступать под воздействием Солнца подобно узлам лунной орбиты, и из этих попятных движений в силу взаимной связанности всех этих тел должно составляться движение в мениске, заставляющее отступать точки его пересечения с эклиптикой. Но этот мениск, прилегающий к сфере, которую он покрывает, сообщает ей часть своего попятного движения, которое от этого значительно замедляется. Поэтому пересечения экватора с эклиптикой, т. е. равноденствия, под действием Солнца должны иметь попятное движение. Попробуем вникнуть в его законы и причину.

Для этого рассмотрим действие Солнца на кольцо, расположенное в плоскости экватора. Если представить себе, что масса этого светила распределена равномерно по окружности его орбиты, предполагаемой круговою, то очевидно, что воздействие этой твердой орбиты представит среднее воздействие Солнца. Если разложить это воздействие на каждую точку кольца, поднятую над эклиптикой, на две составляющие, из которых одна находится в плоскости кольца, а другая — перпендикулярна к этой плоскости, то легко видеть, что равнодействующая этих последних составляющих, приложенных ко всем этим точкам, перпендикулярна к той же плоскости и приложена к диаметру кольца, перепендикулярного к линии его узлов. Воздействие солнечной орбиты на часть кольца, лежащую ниже эклиптики, дает подобную же равнодействующую, перпендикулярную к плоскости кольца и приложенную к нижней части того же диаметра. Эти две равнодействующие стремятся приблизить кольцо к эклиптике, заставляя его двигаться к линии узлов. Поэтому при отсутствии вращательного движения кольца его наклон к эклиптике под влиянием среднего действия Солнца уменьшился бы, а его узлы были бы неподвижны. Но мы предполагаем здесь, что кольцо вращается одновременно с Землей. Это движение сохраняет постоянство наклона кольца к эклиптике, но превращает действие Солнца в попятное движение узлов. Это вращательное движение передает узлам то изменение, которое при отсутствии вращения перешло бы на наклонность, а наклонности дает постоянство, которым обладали бы узлы. Чтобы понять причину этого любопытного изменения, повернем на бесконечно малую величину положение кольца таким образом, чтобы плоскости этих двух положений пересекались по диаметру, перпендикулярному линии узлов. В конце какого-либо момента движение каждой из его точек можно разложить на два: первое — одно должно остаться в следующий момент, и второе — перпендикулярное к плоскости кольца должно быть уничтожено. Ясно, что равнодействующая этих вторых движений относительно всех точек верхней части кольца

будет перпендикулярна к его плоскости и находиться на диаметре, о котором мы говорили. Это же будет справедливо и для нижней части кольца. Для уничтожения этой равнодействующей действием солнечной орбиты и сохранения кольца в равновесии относительно своего центра под действием этих сил, необходимо, чтобы они были противоположны и их моменты относительно этой точки были одинаковыми. Первое из этих условий предусматривает, чтобы изменение предполагаемых нами положений кольца было попятным; а второе условие определяет величину этого изменения и, следовательно, скорость попятного движения его узлов. Легко видеть, что эта скорость пропорциональна массе Солнца, деленной на куб его расстояния от Земли и умноженной на косинус наклонности эклиптики.

Так как плоскости кольца в двух последовательных положениях пересекаются по диаметру, перпендикулярному линии узлов, наклонности этих двух плоскостей к эклиптике постоянны. Следовательно, наклонность кольца не изменяется средним влиянием действия Солнца.

Как показывает анализ, все, что мы видели относительно кольца, имеет место и для любого сфероида, мало отличающегося от сферы. Среднее действие Солнца вызывает движение равноденствий, пропорциональное массе этого светила, разделенной на куб его расстояния и умноженной на косинус наклонности эклиптики. Это движение — попятное, если сфероид сжат у полюсов. Его скорость зависит от этого сжатия, но наклонность экватора к эклиптике всегда остается неизменной.

Действие Луны подобным же образом создает попятное движение узлов земного экватора в плоскости ее орбиты. Но положение этой плоскости и ее наклон к экватору непрерывно изменяются под воздействием Солнца; и попятное движение узлов экватора на лунной орбите, производимое действием Луны и пропорциональное косинусу этого наклона, также переменное. Впрочем, если предположить его равномерным, пришлось бы в зависимости от положения лунной орбиты изменять попятное движение равноденственных точек и наклонность экватора к эклиптике. Довольно простых вычислений достаточно, чтобы показать, что из действия Луны в сочетании с движением плоскости ее орбиты, вытекает: 1. Среднее движение точек равноденствия равно тому, которое это светило произвело бы, если бы двигалось в самой плоскости эклиптики. 2. Неравенство, вычитаемое из попятного движения, пропорционально синусу долготы восходящего узла лунной орбиты. 3. Уменьшение наклонности эклиптики пропорционально косинусу того же угла. Эти два неравенства в совокупности представляются движением земной оси, мысленно продолженной до неба, по небольшому эллипсу в соответствии с законами, изложенными в XII главе первой книги. Большая ось этого эллипса относится к малой оси как косинус наклонности эклиптики относится к косинусу двойной величины этой же наклонности.

Из того, что было сказано, можно понять причину нутации земной оси и предварения равноденствий. Но строгий расчет и сравнение его результатов с наблюдениями являются пробным камнем всякой теории. Теория силы тяжести обязана Даламберу тем, что он проверил ее в отношении двух предыдущих явлений. Этот великий геометр очень красивым

методом первый определил движение земной оси при любой форме и плотности слоев, составляющих земной сфероид. Он не только получил результаты, хорошо согласующиеся с наблюдениями, но, помимо этого, определил истинные размеры малого эллипса, описываемого полюсом Земли, относительно которых наблюдения Брадлея оставляли некоторую неуверенность. Его трактат «Предварение равноденствий», появившийся через полтора года после открытия Брадлеем нутации земной оси, не менее замечателен в истории механики, чем это открытие в анналах астрономии.

Влияние светила на движения земной оси и морей пропорциональны массе этого светила, деленной на куб его расстояния от Земли. Поскольку нутация земной оси вызывается единственно действием Луны, тогда как средняя прецессия равноденствий является результатом объединенных действий Луны и Солнца, ясно, что наблюденные величины этих двух явлений должны дать отношение этих действий. Предполагая вместе с Брадлеем, что годичная прецессия равноденствий равна $154.^{cc}4$ [$50.''0$] и полная величина нутации равна $55.^{cc}6$ [$18.''0$], находим, что действие Луны почти точно в два раза больше, чем Солнца. Но небольшое различие в величине нутации производит очень большую разницу в относительном действии этих двух светил. Наиболее точные наблюдения дают для этой величины $58.^{cc}02$ [$18.''80$], откуда отношение массы Луны к массе Земли получается равным 1/75.

Явления прецессии и нутации проливают новый свет на строение земного сфероида. Они ставят предел сжатию Земли, предполагаемой эллиптической, и из этого следует, что оно не больше 1/247.7; это согласуется с результатами наблюдения маятников. В главе XII мы видели, что в выражении для земного радиуса есть члены, которые, будучи сами по себе мало заметными и мало влияющими на длину маятника, очень сильно изменяют величину градусов меридиана эллиптической фигуры. Эти члены полностью исчезают из значений прецессии и нутации, и потому эти явления согласуются с опытами по качанию маятников. Следовательно, существование этих членов согласовывает наблюдения лунного параллакса и маятников, а также градусные измерения с явлениями прецессии и нутации.

Каковы бы ни были фигуры и плотности, которые мы можем предположить у разных слоев Земли, является ли она телом вращения или нет, если только она мало отличается от сферы, можно всегда указать такое твердое эллиптическое тело вращения, у которого и прецессия, и нутация были бы такими же. Так, по гипотезе Бугера, о которой мы говорили в главе VII и по которой возрастание градусов меридиана пропорционально четвертой степени синуса широты, эти явления совершенно таковы, как если бы Земля была эллипсоидом, эллиптичность которого равна 1/183. Но мы уже видели, что наблюдения не позволяют предположить у него эллиптичность, большую чем 1/247.7. Следовательно, эти наблюдения, так же как и наблюдения маятников, вынуждают нас отказаться от этой гипотезы.

Выше предполагалось, что Земля — полностью твердое тело. Но по-

скольку эта планета в значительной части покрыта водами морей, не должно ли их действие изменять явления прецессии и нутации? Это необходимо исследовать.

Так как воды морей из-за своей текучести уступают притяжению Солнца и Луны, с первого взгляда может показаться, что их противодействие совсем не должно влиять на движение земной оси. Так, Даламбер и все геометры, занимавшиеся после него этими движениями, совершенно пренебрегали этим противодействием. Они даже исходили из этого при согласовании наблюденных величин прецессии и нутации с результатами измерения градуса меридиана. Однако более глубокое исследование этого вопроса показывает, что текучесть морских вод не является достаточным основанием, чтобы пренебречь их влиянием на прецессию равноденствий, так как, если, с одной стороны, они подчиняются действию Солнца и Луны, то, с другой стороны, сила тяжести непрерывно приводит их к состоянию равновесия и позволяет им делать лишь небольшие колебания. Поэтому возможно, что своим притяжением и давлением на сфероид, покрываемый ими, воды хотя бы частично дают земной оси те движения, которые она получила бы от них, если бы они сделались твердыми. К тому же можно с помощью очень простого рассуждения убедиться, что их противодействие — того же порядка, как и прямое действие Солнца и Луны на твердые части Земли.

Вообразим, что эта планета является однородной и имеет ту же плотность, что и море. Предположим еще, что воды принимают в каждый момент фигуру, соответствующую равновесию сил, которые приводят их в движение. Если бы при таких предположениях Земля сделалась вдруг совершенно жидкой, она сохранила бы ту же фигуру, и все ее части были бы во взаимном равновесии. Поэтому земная ось не имела бы никакого стремления к перемещению. Очевидно, что это равновесие должно существовать также в случае, если одна часть этой массы, затвердевая, образовала бы сфероид, покрытый морем. Приведенные гипотезы служат основой теории Ньютона о фигуре Земли и морских приливах. Замечательно,что в бесконечном множестве гипотез, которые можно построить по этому предмету, этот великий геометр выбрал две, которые не дают ни прецессии, ни нутации, так как противодействие вод уничтожает влияние Солнца и Луны на земное ядро, какова бы ни была его фигура. В самом деле, эти две гипотезы, и особенно последняя, не согласуются с природой, но *a priori* видно, что влияние противодействия вод, хотя и отличается от того, что предполагал Ньютон, все-таки того же порядка.

Проведенные мной исследования колебаний моря дали мне способ определять влияние этого противодействия вод, применяя гипотезы, соответствующие действительным условиям природы. Они привели меня к следующей примечательной теореме:

*каковы бы ни были распределения морских глубин и фигура покрываемого морем сфероида, явления прецессии и нутации остаются теми же, как если бы море составляло с этим сфероидом одну твердую массу.*
Если бы Солнце и Луна только одни действовали на Землю, средняя наклонность эклиптики к экватору была бы постоянна. Но мы уже видели,

что влияние планет непрерывно изменяет положение земной орбиты, и в результате ее наклонность к экватору уменьшается; это подтверждается всеми древними и современными наблюдениями. По той же причине точки равноденствия имеют прямое годичное движение, равное $0.^{cc}9659$ [$0.''3130$]. Таким образом, годичная прецессия, производимая совместно Солнцем и Луной, уменьшается на эту величину действием планет, и, без их воздействия она была бы равна $155.^{cc}5927$ [$50.''4120$]. Эти эффекты не зависят от сжатия земного сфероида, но влияние Солнца и Луны на этот сфероид должно изменять их, так же как и их законы.

Отнесем к неподвижной плоскости положение орбиты Земли и движение ее оси вращения. Ясно, что действие Солнца из-за вариаций положения эклиптики вызовет колебательное движение, аналогичное нутации, но с той лишь разницей, что продолжительность соответствующих колебаний земной оси будет гораздо больше, чем в случае нутации, так как период вариаций эклиптики несравненно больше, чем период изменения положения плоскости лунной орбиты. Влияние Луны вызывает у этой оси подобные же колебания, так как средняя наклонность ее орбиты к орбите Земли постоянна. Перемещение эклиптики, складываясь с действием на Землю Солнца и Луны, производит изменения в ее наклонности к экватору, очень отличные от тех, которые имели бы место в силу одного этого перемещения. Полная величина этого изменения вследствие перемещения эклиптики, была бы около $12^{g}$ [$11^{\circ}$], но влияние Солнца и Луны уменьшает его приблизительно до $3^{g}$ [$2.^{\circ}7$].

Вариации движения равноденственных точек, производимые теми же причинами, в разные века изменяют продолжительность тропического года. Эта продолжительность уменьшается, когда их движение увеличивается, что имеет место теперь; и ныне год короче года времен Гиппарха приблизительно на 13с [$11^{s}$]. Но это изменение длины года имеет пределы, которые еще более ограничены действием Солнца и Луны на земной сфероид. Величина этих пределов была бы около 500с [$432^{s}$] из-за одного только перемещения эклиптики, но она уменьшается до 120с [$104^{s}$] под влиянием действия Солнца и Луны.

Наконец, сами сутки, как мы определили их в первой книге, благодаря совместному действию перемещения эклиптики и влияния Солнца и Луны, подвержены очень малым изменениям, указанным теорией, но неощутимым для наблюдателей. По этой теории, вращение Земли равномерно и средняя продолжительность суток может считаться постоянной, что очень важно для астрономии, так как эта продолжительность служит мерой времени и обращения небесных тел. Если бы она изменялась, это было бы заметно по продолжительности этих обращений, которые пропорционально уменьшались бы или увеличивались. Но действие небесных тел не вызывает никаких заметных изменений в продолжительности суток.

Однако можно было бы думать, что пассатные ветры, дующие непрерывно между тропиками с востока на запад, уменьшают скорость вращения Земли своим действием на континенты и на горы. Невозможно подвергнуть это действие математическому анализу. К счастью, с помощью

принципа сохранения площадей, изложенного нами в третьей книге, можно показать, что их влияние на вращение Земли равно нулю. Согласно этому принципу, сумма всех молекул Земли, моря и атмосферы, умноженных соответственно на площади, описываемые вокруг центра тяжести Земли их радиусами-векторами, спроектированными на плоскость экватора, постоянна в равные промежутки времени. Солнечное тепло не производит изменений, так как оно расширяет тела одинаково во всех направлениях. Отсюда видно, что если бы скорость вращения Земли уменьшилась, упомянутая выше сумма стала бы меньше. Поэтому пассатные ветры, порожденные солнечным теплом, не изменяют этого вращения. Подобное же рассуждение доказывает, что морские течения тоже не должны вносить заметного изменения. Чтобы чувствительно изменить период вращения, необходимо значительное перемещение частей земного сфероида. Так, большая масса, перенесенная с полюса на экватор, увеличила бы этот период. Он стал бы короче, если бы плотные тела приблизились к центру или к оси вращения Земли. Но мы не видим никакой причины, которая могла бы переместить достаточно большие массы на значительное расстояние, в результате чего произошли бы заметные изменения в продолжительности суток, которую все позволяет считать одним из самых постоянных элементов системы мира. То же относится и к точкам, в которых ось вращения Земли встречается с ее поверхностью. Если бы эта планета последовательно вращалась вокруг разных диаметров, образующих между собой значительные углы, экватор и полюса меняли бы свои места на Земле, и моря, перемещаясь к новому экватору, покрывали бы и открывали попеременно высокие горы. Но все изыскания, сделанные мной относительно перемещения полюсов на поверхности Земли, доказали мне, что это перемещение незаметно.[43]

## Глава XV

## О ЛИБРАЦИИ ЛУНЫ

Теперь нам остается объяснить причину либрации Луны и движения узлов ее экватора. Луна вследствие ее вращательного движения сжата немного у полюсов, но притяжение Земли должно было удлинить ось Луны, направленную к этой планете. Если бы Луна была однородной и жидкой, чтобы находиться в равновесии, она приняла бы фигуру эллипсоида, у которого малая ось проходила бы через полюса вращения, а наибольшая ось была бы направлена к Земле и располагалась в плоскости лунного экватора. Средняя ось, расположенная в той же плоскости, была бы перпендикулярна двум другим. Избыток наибольшей оси над наименьшей был бы в 4 раза больше, чем избыток средней оси над малой, и если взять малую ось за единицу, равнялся бы приблизительно 1/27640.

Легко представить себе, что если бы большая ось Луны отклонилась немного от направления радиуса-вектора, соединяющего ее центр с центром Земли, земное притяжение стремилось бы вернуть ее на этот радиус,

подобно тому как сила тяжести возвращает маятник к вертикали. Если бы первоначальная скорость вращения Луны была достаточно велика, чтобы преодолеть это стремление, период ее вращения не был строго равен периоду обращения, и разность этих периодов открывала бы нам последовательно все точки лунной поверхности. Но поскольку вначале угловые движения и обращения Луны мало отличались между собой, сила, с которой большая ось Луны удалялась от ее радиуса-вектора, была недостаточна, чтобы преодолеть стремление этой оси к радиусу-вектору, вызванное земным притяжением, которое, таким образом, сделало эти движения совершенно равными. Поэтому, точно так же как маятник, отклоненный очень маленькой силой от вертикали, возвращается к ней, делая непрерывные колебания в каждую сторону, большая ось лунного сфероида должна колебаться в обе стороны от среднего радиуса-вектора своей орбиты. Отсюда происходит движение либрации, величина которой зависит от начальной разности угловых движений вращения и обращения Луны. Эта либрация очень мала, так как наблюдатели не смогли ее обнаружить.

Итак, мы видим, что теория тяготения удовлетворительно объясняет строгое равенство двух средних угловых движений вращения и обращения Луны. Было бы совершенно невероятно предположить, что с самого начала эти движения были в точности одинаковыми. Но для объяснения этого явления достаточно, чтобы их первоначальная разность была очень мала. В этом случае то полное равенство, которое мы наблюдаем, установилось притяжением Земли.

Так как среднее движение Луны подвержено большим вековым неравенствам, доходящим до нескольких окружностей, ясно, что если бы ее среднее движение вращения было совершенно равномерно, этот спутник из-за своих неравенств последовательно открывал бы Земле все точки своей поверхности. Видимый диск Луны менялся бы незаметным образом по мере того, как развертывались бы эти неравенства. Одни и те же наблюдатели видели бы его приблизительно одинаковым, и он представлялся бы заметно различным только для наблюдателей, разделенных интервалом времени в несколько веков. Но причина, установившая такое полное равенство средних движений вращения и обращения Луны, навсегда исключает для обитателей Земли надежду открыть части поверхности Луны, противоположные ее полушарию, обращенному к нам.[44] Земное притяжение, непрерывно приводя к нам большую ось Луны, заставляет ее вращательное движение участвовать в вековых неравенствах ее обращения и постоянно направляет к Земле одно и то же ее полушарие. Такая же теория должна быть распространена на все спутники, у которых наблюдалось равенство периодов вращения и обращения вокруг своих планет.

Странное явление — совпадения узлов экватора Луны с узлами ее орбиты — является еще одним следствием земного притяжения. Это впервые показал Лагранж с помощью прекрасного анализа, который привел его к полному объяснению всех наблюденных движений лунного сфероида. Плоскости экватора и лунной орбиты и плоскость, проведенная через ее центр параллельно эклиптике, всегда имеют почти одно и то же пересече-

ние. Я обнаружил, что вековые движения эклиптики не изменяют ни совпадение узлов этих трех плоскостей, ни их средней наклонности, которую земное притяжение постоянно поддерживает неизменной.

Заметим здесь, что указанные явления не могли бы иметь места, если принять, что Луна, изначально жидкая и образованная из слоев произвольной плотности, приняла затем фигуру, соответствующую их равновесию. Эти явления указывают на гораздо большие разности в величине осей лунного сфероида, чем те, которые следуют из этой гипотезы. Высокие горы, наблюдаемые на поверхности Луны, несомненно, имеют очень заметное влияние на эти явления, тем более, что сжатие Луны невелико и масса ее незначительна.

Когда природа подчиняет средние небесные движения определенным условиям, они всегда сопровождаются колебаниями, величина которых произвольна. Так, равенство средних движений вращения и обращения Луны сопровождается истинной либрацией этого спутника. Подобно этому, совпадение средних узлов лунного экватора и ее орбиты сопровождается либрацией узлов этого экватора около узлов орбиты, либрацией очень маленькой, поскольку она до сих пор ускользала от наблюдений. Мы уже видели, что истинная либрация большой оси Луны незаметна, а в главе VI было указано, что либрация первых трех спутников Юпитера также не была обнаружена. Замечательно, что эти либрации, величина которых произвольна и могла бы быть значительной, тем не менее очень малы; это можно приписать тем же причинам, которые вначале установили условия, от которых эти либрации зависят. Но относительно произвольных величин, связанных с первоначальным движением вращения небесных тел, естественно думать, что без притяжения со стороны, все их части из-за трения и сопротивления, которые они противопоставляют своим взаимным движениям, с течением времени пришли бы в состояние равновесия, которое может существовать только при равномерном движении вокруг неизменной оси, так что наблюдения не должны отмечать в этом движении ничего, кроме неравенств, вызванных этими посторонними притяжениями. Как мы убедились из самых точных наблюдений, это имеет место для Земли. Тот же вывод распространяется на Луну и, вероятно, на все небесные тела.

Если Луна встречалась с какими-либо кометами (что, по теории вероятностей, должно было случиться в безграничности времен), их массы должны были быть чрезвычайно малыми, так как удар кометы, равной 1/100000 доле Земли, был бы достаточен, чтобы сделать заметной истинную либрацию этого спутника, которая, однако, не была обнаружена наблюдениями. Это рассуждение, вместе с тем, которое мы привели в главе IV, должно успокоить астрономов, опасающихся, что элементы их таблиц могут быть изменены действием комет.

Равенство движений вращения и обращения Луны дает астрономам, которые хотят описать ее поверхность, универсальный меридиан, данный самой природой и легко находимый во все времена, — преимущество, которого не имеет география при описании Земли. Этот меридиан проходит через полюсы Луны и конец ее большой оси, всегда почти точно направ-

ленной к нам. Хотя этот конец оси никак не отмечен на поверхности Луны, его положение в любой момент может быть определено, если учесть, что оно совпадает с линией средних узлов лунной орбиты, когда она сама совпадает со средним местом Луны.

Положение главных пятен на ее поверхности было таким способом определено так же точно, как и положения многих достопримечательных мест на Земле.

## Глава XVI

## О СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЯХ ЗВЕЗД

После того как мы рассмотрели движения тел солнечной системы, нам остается рассмотреть движения звезд, которые, по закону всемирного тяготения, все должны притягиваться друг к кругу и описывать гигантские орбиты. Наблюдения уже позволили обнаружить эти огромные движения, вероятно частично являющиеся отражением поступательного движения солнечной системы, которое, по законам оптики, мы переносим в противоположном направлении на звезды. Если рассматривать большое число звезд, их истинные движения, происходящие во всех направлениях, должны исключаться из выражения движения Солнца, выведенного по совокупности их наблюденных собственных движений. Именно таким путем узнали, что солнечная система и все, что ее окружает, движется к созвездию Геркулеса со скоростью, по меньшей мере, равной скорости движения Земли по своей орбите. Но очень точные и многочисленные наблюдения, сделанные с интервалом в один—два века, точно определят эту важную точку системы мира.[45]

Помимо этих больших движений Солнца и звезд, наблюдаются еще особые движения в *двойных звездах*. Так называют две очень близко расположенные звезды, которые в телескоп с незначительным увеличением кажутся одной звездой. Их кажущаяся близость может быть вызвана тем, что они находятся очень близко на одном луче зрения. Но такое расположение уже является указанием на их возможную действительную близость, и если, кроме того, они имеют значительные собственные движения, очень мало разнящиеся по прямому восхождению и по склонению, то становится чрезвычайно вероятным, что они образуют систему из двух очень близко расположенных тел и что малая разность их собственных движений вызвана вращательным движением каждой из них вокруг их общего центра тяжести. Без этого одновременное существование этих трех условий: видимой близости двух звезд и приблизительного равенства их собственных движений как по прямому восхождению, так и по склонению, было бы совершенно невероятно.

61 Лебедя и ее спутник сочетают эти три условия замечательным образом: расстояние, разделяющее их, всего $6^{cc}$ [$2''$], их годичные собственные движения со времен Брадлея и до наших дней равны $15.^{cc}75$ [$0.^{s}34$] и $16.^{cc}03$ [$0.^{s}35$] по прямому восхождению и $10.^{cc}24$ [$3.''32$] и $9.^{cc}56$ [$3.''10$] — по склонению. Поэтому чрезвычайно вероятно, что эти

две звезды очень близки между собою и что они обращаются вокруг их общего центра тяжести с периодом в несколько веков.[46] Несколько других двойных звезд представляют подобные же явления. Если удастся узнать параллаксы некоторых из этих звезд, то по времени обращения одной вокруг другой двух звезд, образующих двойную звезду, можно будет получить сумму их масс, отнесенную к массе Солнца.

Картина неба открывает нам многие группы ярких звезд, сосредоточенных в небольшом пространстве. Таковы, например, Плеяды. Подобное расположение с большой вероятностью указывает на то, что звезды каждой группы очень близки между собой по сравнению с расстоянием, отделяющим их от других звезд, и что вокруг их общего центра тяжести они имеют движения, узнать которые позволят последующие века.

## Глава XVII

### РАЗМЫШЛЕНИЯ О ЗАКОНЕ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Рассматривая совокупность явлений солнечной системы, их можно распределить на три следующих класса: первый охватывает движения центров тяжести небесных тел вокруг центров главных сил, побуждающих их к движению; второй включает все, что относится к фигуре и к колебаниям покрывающего их флюида; наконец, к третьему классу относятся движения этих тел вокруг их центров тяжести. В этом порядке мы и рассматривали все эти явления и видели, что они являются необходимым следствием принципа всемирного тяготения. Этот принцип позволил узнать большое число неравенств, которые было бы почти невозможно выделить из наблюдений. Он дал способ подчинить небесные движения надежным и точным законам. Астрономические таблицы, целиком основанные на законе тяготения, заимствуют теперь из наблюдений только произвольные элементы, которые нельзя узнать иначе; и не следует надеяться еще улучшить эти таблицы иным способом, кроме совершенствования точности как наблюдений, так и теории.

Движение Земли благодаря простоте, с которой оно объясняет небесные явления, было признано астрономами и получило новое подтверждение из принципа тяготения, который поднял его на высшую ступень очевидности, достижимую физическими науками. Достоверность теории можно увеличивать, либо уменьшая число гипотез, на которые она опирается, либо увеличивая число явлений, которые она объясняет. Принцип тяготения дал теории движения Земли оба этих достоинства. Поскольку это движение является его необходимым следствием, оно не добавляет никаких новых предположений к этой теории; но чтобы объяснить движение светил, Коперник приписывал Земле три различных движения: одно — вокруг Солнца, второе — вращение вокруг себя самой и, наконец, третье — движение ее полюсов вокруг полюсов эклиптики. В соответствии с принципом тяготения, все эти движения зависят от одного

движения, сообщенного Земле в направлении, не проходящем через ее центр тяжести. В силу этого движения она вращается вокруг Солнца и самой себя, приняла фигуру, сплюснутую у полюсов, и действие Солнца и Луны на эту фигуру заставляет ось Земли медленно двигаться вокруг полюсов эклиптики. Открытие этого принципа сократило до самого малого возможного числа предположения, на которых Коперник обосновал свою теорию. Этот принцип имеет то достоинство, что он связывает теорию со всеми астрономическими явлениями. Без него эллиптичность планетных орбит, законы, которым следуют планеты и кометы в своих движениях вокруг Солнца, их вековые и периодические неравенства, многочисленные неравенства Луны и спутников Юпитера, предварение равноденствий, нутация земной оси, движение лунной оси, наконец, морские приливы и отливы были бы лишь не связанными между собой результатами наблюдений. И что действительно достойно восхищения, все эти явления, которые кажутся с первого взгляда столь разрозненными, вытекают из общего закона, который связывает их с движением Земли так, что, однажды приняв это движение, мы путем геометрических рассуждений приходим ко всем этим явлениям. Поэтому каждое из них дает доказательство его существования; и если учесть, что теперь нет ни одного явления, которое не было бы приведено к закону тяготения, и что этим законом определяются с наибольшей точностью положения небесных тел, в каждое мгновение и на всех их путях, то можно не опасаться, что он будет опровергнут каким-нибудь до сих пор не наблюденным явлением. Наконец, его подтверждает то, что планета Уран и ее спутники, а также четыре недавно открытые малые планеты подчиняются ему. Невозможно отвергать совокупность этих доказательств и не согласиться с тем, что ничто не доказано лучше в натуральной философии, чем движение Земли и принцип всемирного тяготения, пропорционального массам и обратно пропорционального квадратам расстояний.

Исключительная трудность проблем, относящихся к системе мира, заставляет прибегать к приближениям, которые всегда оставляют опасения, что пренебреженные величины окажут на их результаты заметное влияние. Когда наблюдения наводили геометров на мысль, что это влияние имеет место, они возвращались к своему анализу. Исправляя его, они всегда находили причину наблюденных аномалий. Они определяли законы и часто, открывая неравенства, опережали наблюдения, которые их еще не указывали. Теории Луны, Сатурна, Юпитера и его спутников дают, как мы видели, много примеров такого рода. Поэтому можно сказать, что сама природа содействовала улучшению астрономических теорий, созданных исходя из принципа всемирного тяготения. По моему мнению, это одно из самых сильных доказательств истинности этого удивительного принципа.

Является ли этот принцип первичным законом природы? Не есть ли он лишь общее следствие неизвестной причины? Здесь неведение, в котором мы пребываем относительно внутренних свойств материи, останавливает нас и отнимает всякую надежду удовлетворительным образом ответить на эти вопросы. Вместо гипотез ограничимся более подробным рас-

смотрением того, каким образом принцип тяготения был применен геометрами.

Они исходили из пяти следующих предположений: 1) тяготение имеет место между самыми малыми молекулами тел; 2) оно пропорционально массам; 3) оно обратно пропорционально квадрату расстояния; 4) оно мгновенно передается от одного тела к другому; 5) наконец, оно одинаково действует на тела, находящиеся в покое и на те, которые, уже двигаясь в его направлении, кажутся частично освобожденными от его действия.

Первое из этих предположений, как мы видели, есть необходимый результат равенства, существующего между действием и противодействием. Каждая молекула Земли должна притягивать всю Землю так же, как она притягивается сама. Это предположение подтверждается к тому же измерениями градусов меридиана и наблюдениями маятника, так как из неправильностей фигуры Земли, как будто указываемых измеренными градусами, если можно так выразиться, выделяют черты правильной фигуры, согласующейся с теорией. Два неравенства лунного движения, по долготе и широте, вызванные эллиптичностью Земли, также доказывают, что ее притяжение складывается из притяжения всех ее молекул. Наконец, то же самое доказывается для Юпитера большим влиянием его сжатия на движение узлов и перийовиев его спутников.

Пропорциональность силы тяготения массам доказывается на Земле опытами с маятником, продолжительность колебания которого в точности одинакова, каково бы ни было вещество, которое заставляют колебаться. В небесных пространствах она доказывается постоянным отношением квадратов времен обращения тел, движущихся вокруг общего фокуса, к кубам больших осей их орбит. Действие силы тяжести не нарушается причинами, которые, не меняя массы системы тел, могут значительно изменять ее внутреннее строение. Так, кипение, расширение газов, электричество, теплота и соединения, получаемые путем смешивания нескольких веществ, заключенных в закрытом сосуде, не меняют вес системы ни во время, ни после смешивания. Подобно этому наблюдали, что после сильного намагничивания стальная полоса сохраняет тот же вес, что и до него. Равенство действия противодействию и аналогия доказывают, что подобные явления, происходящие на Земле и во всех небесных телах, не изменяют их притягивающих сил иначе, как путем изменения, производимого ими в положении молекул вокруг центра тяжести этих тел; действие такого изменения становится неощутимым на больших расстояниях.

Мы видели в главе I, с какой точностью почти абсолютная неподвижность перигелиев планетных орбит указывает на закон обратной пропорциональности тяготения квадратам расстояний. Теперь, когда мы знаем причину небольших движений этих перигелиев, мы должны считать этот закон строгим. Формула закона одинакова для всех эманаций, выходящих из одного центра, таких, как свет. Представляется даже, что все силы, действие которых замечается на ощутимых расстояниях, следуют этому закону. Недавно узнали, что электрические и магнитные притяжения

и отталкивания убывают в отношении квадратов расстояний, поскольку все эти силы ослабляются при своем распространении только потому, что они распространяются как свет, причем их суммы одинаковы на различных сферических поверхностях, которые можно вообразить вокруг их фокусов. Замечательным свойством этого закона природы является то, что если бы размеры всех тел нашей вселенной, их взаимные расстояния и их скорости пропорционально возросли или уменьшились, они описывали бы кривые, полностью подобные тем, которые они описывают; и их видимые движения остались бы в точности такими же, поскольку силы, движущие ими, являются результатом притяжений, пропорциональных массам, разделенным на квадраты расстояний, и они возросли бы или уменьшились пропорционально размерам новой вселенной. В то же время видно, что это свойство может принадлежать только закону природы. Таким образом, видимые движения вселенной независимы от ее абсолютных размеров, так же как и от абсолютного движения, которое она может иметь в пространстве; мы можем наблюдать и познавать только их соотношения. Этот закон дает сферам свойство взаимно притягиваться так, как если бы их массы были сосредоточены в их центрах. Он ограничивает орбиты и фигуры небесных тел линиями и поверхностями второго порядка, по крайней мере, если пренебречь их возмущениями и полагать эти тела состоящими из флюида.

Мы не имеем никакой возможности измерить время распространения тяготения, поскольку Солнце, коль скоро его притяжение однажды достигло планет, продолжает воздействовать на них, как если бы его притягивающая сила передавалась до пределов планетной системы. Поэтому нельзя знать, за какое время тяготение достигает Земли, так же как было бы невозможно без затмений спутников Юпитера и без аберрации узнать, что свет распространяется с конечной скоростью. Иначе обстоит дело с маленькой разницей, которая может существовать в действии силы тяготения на тела в зависимости от направления и величины их скорости. Расчет показал мне, что из этой разницы следует возрастание средних движений планет вокруг Солнца и спутников вокруг своих планет. Я вообразил, что таким способом можно объяснить вековое уравнение Луны, поскольку думал, так же как и все геометры, что оно необъяснимо при принятых представлениях о действии тяготения. Я нашел, что если бы вековое уравнение Луны происходило по этой причине, то чтобы полностью заменить ею тяготение Луны к Земле, надо было бы приписать Луне скорость, направленную к центру этой планеты, по крайней мере, в 7 000 000 раз большую, чем скорость света. Поскольку истинная причина векового уравнения Луны сегодня хорошо известна, мы уверены, что скорость распространения тяготения еще гораздо больше. Значит, эта сила действует со скоростью, которую мы можем рассматривать как бесконечную; и мы должны заключить, что притяжение Солнца передается за почти неделимое мгновенье до крайних пределов солнечной системы.

Существуют ли между небесными телами другие силы, помимо их взаимного притяжения? Мы этого не знаем, но, по крайней мере, можем

утверждать, что их действие не замечается. Мы можем также утверждать, что все эти тела испытывают до сих пор не замеченное сопротивление со стороны флюидов, сквозь которые они проходят, таких как свет, хвосты комет и зодиакальный свет. Масса Солнца должна беспрерывно уменьшаться из-за непрерывной эмиссии его лучей. Но то ли из-за исключительной легкости света, то ли потому, что это светило восстанавливает потерю неизвестным до сих пор способом, несомненно, что за 2000 лет его вещество не уменьшалось даже на 1/2000000.

В электрических и магнитных явлениях природа представляет нам силы отталкивания, которые следуют тому же закону, что и всемирное тяготение. С помощью очень тонких опытов Кулон показал, что точки, несущие одинаковые электрические заряды, отталкиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния, и притягиваются, следуя тому же закону, если заряды противоположны. Рассматривая электричества противоположного знака как два различных флюида, совершенно подвижных в проводящих телах и удерживаемых поверхностями непроводящих тел, полагая затем, что молекулы одного и того же флюида взаимно отталкиваются и притягивают молекулы другого флюида, следуя закону небесных притяжений, можно применять к ним формулы, относящиеся к этим притяжениям. Таким способом я показал, что в проводящих телах электрический флюид для равновесия должен находиться полностью на поверхности, где он образует очень тонкий слой, сдерживаемый окружающим его воздухом. Его отталкивание внутри тела равно нулю, но на внешней поверхности оно в каждой точке пропорционально толщине слоя. Давление, испытываемое каждой из его внешних точек, вследствие которого флюид стремится удалиться, пропорционально квадрату этой толщины. На каком-либо эллипсоиде две поверхности слоя, внешняя и внутренняя, подобны и концентричны поверхности эллипсоида. Если это вытянутый эллипсоид вращения, стремление флюида удалиться с полюсов относится к его стремлению покинуть экватор как квадрат большой оси к квадрату малой, и это дает математическое объяснение способности, которою природа наделила острия тел. Но распределение электрических флюидов на теле произвольной формы или на нескольких телах, находящихся вместе, является исключительно трудной проблемой, которая может привести к очень любопытным аналитическим исследованиям, так как решение этих трудных вопросов имеет то преимущество, что при этом совершенствуется сразу и физика и анализ. Г-н Пуассон с помощью очень искусного анализа уже вывел закон, по которому электричество распределяется по поверхности двух находящихся вместе сфер. Согласие этих результатов с опытами Кулона подтверждает правильность принципа, служащего им основой. Надо, впрочем, рассматривать все эти силы лишь как математические представления, благодаря которым эти силы могут быть подвергнуты вычислению, а не как качества, присущие электрическим молекулам. Возможно, что они являются равнодействующими других сил, аналогичных химическому сродству, которые сами по себе ощутимы при исключительной близости к контакту, но действие которых с помощью промежуточных флюидов передается на заметные расстояния

и в отношении, обратном квадратам этих расстояний. Притяжения малых тел, плавающих на поверхности жидкостей, в следующей главе дадут нам замечательный пример такой передачи.

## Глава XVIII

## О МОЛЕКУЛЯРНОМ ПРИТЯЖЕНИИ *

Притяжение исчезает между телами незначительных размеров и появляется снова в их элементах, принимая бесконечно разнообразные формы. Твердость, кристалличность, преломление света, поднятие и понижение жидкостей в капиллярных пространствах, а также все химические реакции суть результаты действия сил, познание которых является одной из главных целей изучения природы. Так, материя подчинена власти различных притягивающих сил: одна из них, бесконечно простираясь в пространстве, управляет движениями Земли и небесных сил; все, что относится к внутреннему строению составляющих их веществ, зависит главным образом от других сил, действие которых чувствительно только на неуловимо малых расстояниях. Поэтому почти невозможно познать законы их изменения с расстоянием. К счастью, свойство быть заметными лишь в непосредственной близости контакта достаточно, чтобы подвергнуть анализу большое число интересных явлений, зависящих от этих сил. Здесь я представлю вкратце главные результаты этого анализа и этим дополню математическую теорию притягивающих сил в природе.

Мы видели в книге I, что световой луч, переходя из пустоты в прозрачную среду, отклоняется так, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления постоянно. Этот фундаментальный закон диоптрики есть результат действия среды на свет, причем мы предполагаем, что это действие заметно только на неощутимых расстояниях. В самом деле, представим себе среду, ограниченную плоскостью. Ясно, что молекула света перед тем, как ее пересечь, притягивается со всех сторон от перпендикуляра к этой поверхности одинаково, потому что на ощутимом расстоянии от молекулы со всех сторон находится равное число притягивающих молекул. Поэтому их равнодействующая направлена по этому перпендикуляру. После вхождения в среду молекула света продолжает притягиваться вдоль перпендикуляра к поверхности. Если вообразить эту среду разделенной на бесконечно тонкие слои, параллельные ее поверхности, то поскольку притяжение слоев, лежащих выше притягиваемой молекулы, уничтожается притяжением равного числа нижележащих слоев, мы увидим, что молекула света притягивается в точности так, как она притягивалась бы на том же расстоянии от поверх-

---

* В этой главе наблюдается некоторая непродуманность Лапласом отдельных положений и неясность его формулировок. По-видимому, поэтому в следующих изданиях эта глава была исключена (Прим. перев.).

ности перед тем, как ее пересечь. Поэтому испытываемое ею притяжение неощутимо, когда она заметно проникла в прозрачную среду, и ее движение тогда делается равномерным и прямолинейным. Из принципа сохранения живых сил, изложенного в книге III, вытекает, что квадрат начальной скорости молекулы света, разложенной перпендикулярно к поверхности среды, увеличивается всегда на одну и ту же величину, какова ни была бы эта скорость. Параллельно этой поверхности действием среды скорость не изменяется, и, следовательно, возрастание квадрата полной скорости, как и самой этой скорости, не зависит от начального направления светового луча. Отношение скорости в направлении, параллельном поверхности, к начальной скорости образует синус угла падения, а ее отношение к скорости в среде есть синус угла преломления. Поэтому эти два синуса относятся друг к другу как скорости света до и после его входа в среду, и, следовательно, они находятся в постоянном отношении. Разность их квадратов, деленная на квадрат синуса преломления и умноженная на квадрат скорости света в пустоте, выражает действие среды на луч. Разделив его на удельную плотность этой среды, получим ее *преломляющую силу*.

Искривленная поверхность, ограничивающая прозрачную среду, может быть заменена плоскостью, касательной в точке ее пересечения с лучом, так как поскольку действие тел на свет заметно только на неуловимых расстояниях, можно пренебречь действием мениска, заключенного между касательной плоскостью и поверхностью. Поэтому, восставив перпендикуляр к этой поверхности в точке, где ее встречает луч, и взяв синусы углов падения и преломления в том же отношении, как если бы поверхность была плоской, мы получим направление луча в среде.

Переходя из одной среды в другую, свет преломляется таким образом, что синусы углов падения и преломления находятся в постоянном отношении, но тогда преломление света вызывается только разностью действий, испытываемых им со стороны этих сред. Когда один луч проходит несколько прозрачных сред, ограниченных плоскими и параллельными поверхностями, его скорость в каждой среде равна и параллельна той, которую он имел бы, если бы прошел в эту среду непосредственно из пустоты. Вообще, каким бы образом световой луч ни приходил из пустоты в прозрачную среду, его скорость одинакова.

Гипотеза о незаметности действия на ощутимых расстояниях позволяет распространить эти результаты на бесконечно тонкие слои прозрачной среды с переменной плотностью.

С помощью этих принципов, которыми мы обязаны Ньютону, все явления прохождения света через любое число прозрачных сред, а также в атмосфере были подвергнуты строгим расчетам. Эти явления не определяют закона притяжения света телами. Они подчиняются ему только при условии, что он действует лишь на неощутимых расстояниях.

Прозрачная среда различным образом действует на лучи разных цветов. В силу этой разницы белый луч, проходя через прозрачную призму, разлагается на множество цветов. Неравенства скоростей, которое можно

предположить у разных лучей, недостаточно, чтобы объяснить явления, наблюдающиеся при дисперсии света, так как в этом случае дисперсия была бы одинаковой для всех сред, которые одинаково преломляют средние лучи, что противоречит опыту, который только один может ее установить.

Из этих различий в дисперсии света при прохождении через линзы из разных сортов стекла извлекли большую пользу, устранив цвета, появляющиеся вокруг предметов в обычных телескопах, что придало большое совершенство этим инструментам, столь полезным в астрономии.

Описанные выше законы прохождения света изменяются в прозрачных кристаллах. Свет в них представляет особое явление, наблюденное впервые в кристалле исландского шпата. Световой луч, падающий перпендикулярно на грань природного ромбоида этого кристалла, разделяется на два пучка: один из них проходит кристалл, не меняя своего направления; другой отклоняется и проходит через плоскость, параллельную плоскости, проведенной перпендикулярно грани по линии, соединяющей два тупых угла этого ромбоида. Эта линия, следовательно, одинаково наклонена к сторонам этих углов. Она называется *осью кристалла*, а *главным сечением* натуральной или искусственной грани называют плоскость, проведенную по этой оси перпендикулярно грани, а также всякую параллельную ей плоскость.

Разделение светового луча имеет место при любом угле падения. Одна часть его следует закону обычного преломления, другая часть подчиняется закону, открытому Гюйгенсом; этот закон, который можно рассматривать как результат опыта, может быть поставлен в ряд самых прекрасных открытий этого редкого гения. Он пришел к этому закону тем остроумным способом, каким он рассматривал прохождение света, который он считал образованным волнами эфирного флюида. Он полагал, что в прозрачных некристаллических средах скорость этих волн меньше, чем в пустоте, и одинакова во всех направлениях. Но в кристалле исландского шпата он предположил два вида колебаний. Скорость первого из них представлялась, как в некристаллических средах, радиусами сферы, центр которой находится в точке падения светового луча на грань кристалла. Скорость второго была переменной и представлялась радиусами эллипсоида вращения, сжатого у полюсов и имевшего тот же центр, что и предыдущая сфера, причем ось вращения эллипсоида была параллельна оси кристалла. Гюйгенс не указывал причину различия этих колебаний; и удивительные явления, которые дает нам свет, проходя из одного кристалла в другой, о них мы поговорим после, не объясняются его гипотезой. Вместе с трудностями, представляемыми теорией световых волн, это является причиной, почему Ньютон и большинство следовавших ему геометров не оценили по достоинству закон, который связывался Гюйгенсом с этой теорией. Таким образом, этот закон испытал то же, что и прекрасные законы Кеплера, которые долго оставались непризнанными, потому что их ассоциировали с идеями порядка, которыми, к несчастью, этот великий человек заполнил все свои работы.

Однако Гюйгенс подтвердил свой закон большим числом опытов. Выдающийся физик Волластон, проделав очень хитроумным способом различные эксперименты с двойным лучепреломлением в кристалле исландского шпата, нашел их согласными с этим замечательным законом. Наконец, Малю провел множество очень точных опытов с естественными и искусственными гранями этого кристалла и постоянно наблюдал при этом самое полное согласие между опытом и законом Гюйгенса. Поэтому, не колеблясь надо отнести его к числу наиболее достоверных и прекрасных результатов физики. Непосредственные опыты показали Малю, что этот закон распространяется также и на горный хрусталь.

Теперь о явлении, которое демонстрирует свет, подвергшийся двойному преломлению. Если на некотором расстоянии под кристаллом поместить другой кристалл из такого же или из другого вещества, расположенный так, что главные сечения их противоположных граней параллельны, лучи, преломленные в первом кристалле как обычным, так и необычным образом, будут так же преломлены и во втором. Но если один из кристаллов повернуть таким образом, что их главные сечения станут взаимно перпендикулярными, луч, обычным образом преломленный в первом кристалле, необычно преломится во втором, и наоборот. В промежуточных положениях каждый луч, выходящий из первого кристалла, при входе во второй кристалл, разделится на два, интенсивности которых относятся, по-видимому, как квадраты синуса и косинуса угла, образованного между собой главными сечениями. Когда Гюйгенсу указали на это явление в исландском шпате, он с чистосердечием, которое характеризует преданного друга истины, согласился, что его гипотезы не объясняют этого явления; это показывает, как важно отделить их от закона преломления, который он вывел. Это явление с очевидностью указывает, что свет, проходя через кристаллы с двойным лучепреломлением, получает две различные модификации, в силу которых одна часть его преломляется *обыкновенным* образом, а другая *необыкновенным*. Но эти модификации не абсолютны. Они зависят от положения луча относительно оси кристалла, потому что луч, преломленный обычным образом в одном кристалле, преломляется необычно в другом, если главные сечения противоположных граней двух кристаллов взаимно перпендикулярны.

Было бы очень интересно приложить закон Гюйгенса к притягивающим и отталкивающим силам между молекулами, как это сделал Ньютон с обыкновенным преломлением, ибо на этом рубеже геометр останавливается, не стремясь возвыситься до причин этих сил. Но чтобы разрешить эту проблему, надо было бы знать форму молекул кристаллических сред и молекулы света, а также изменения, которые она претерпевает, проникая в эти среды. Незнание нами всех этих данных приводит к необходимости применить к необыкновенному преломлению и отражению лишь общие закономерности действия этих сил. Это применение привело меня к новой теории явлений такого рода, согласие которой с опытом не оставляет сомнения в том, что они вызваны притягивающими и отталкивающими силами между молекулами.

Один из наиболее общих принципов действия этих сил — это принцип живых сил, согласно которому возрастание квадрата скорости молекулы света, проникшей в прозрачную среду на заметное расстояние, остается неизменным для определенного направления, каким бы способом молекула ни вошла в эту среду. Это возрастание выражает, как мы видели, действие среды на свет, и его выражение должно быть гораздо проще, чем выражение закона необыкновенного преломления, который его включает и который зависит еще от положения грани, через которую световой луч проник в кристалл. Таким образом, проблема преломления разделяется на две другие: первая состоит в определении закона преломления, которое соответствует известному закону действия среды; вторая имеет своею целью привести этот последний закон к закону взаимного действия молекул кристалла и света. Мы видели, скольких данных нам не хватает, чтобы ее разрешить. Но первая проблема может быть решена на основании принципа наименьшего действия, независимо от этих данных.

Этот принцип вообще относится к движению точки, подверженной действию сил притяжения и отталкивания. Прилагая его к свету, можно отвлечься от очень малой дуги, которую описывает свет, переходя из пустоты в прозрачную среду, и предположить, что его движение равномерно, когда он проник в нее на заметное расстояние. Принцип наименьшего действия сводится тогда к тому, что свет переходит от одной точки, взятой вне кристалла, к другой точке внутри него так, что если прибавить произведение прямого пути, описанного вне кристалла, на начальную скорость к произведению прямого пути внутри кристалла на приобретенную в нем скорость, сумма будет минимальна. Теперь направление скорости определяется углами, которые оно образует с двумя взаимно перпендикулярными осями. Закон действия среды на свет на основании принципа живых сил дает его скорость, когда он проник в прозрачную среду. Поэтому принцип наименьшего действия для углов, составленных направлением света до и после его вхождения в среду с двумя осями, дает два дифференциальных уравнения, определяющих направление преломленного света как функцию углов, образованных первоначальным направлением с двумя осями. Таким образом, мы получим закон необыкновенного преломления, соответствующего закону влияния среды на свет.

Самый простой закон действия — это тот, выражение которого сводится к постоянной. В этом случае по предыдущему методу находим, что синусы угла преломления и угла падения находятся в постоянном отношении, что соответствует наблюдениям.

За этим законом следует другой, его выражение содержит лишь первую и вторую степени синусов углов, которые преломленный луч составляет с двумя осями. По отношению к кристаллу исландского шпата, если взять за одну из осей ось кристалла, поскольку она симметрична относительно трех заключающих ее сторон, легко видеть, что предыдущее выражение должно зависеть только от угла, составленного ею с направлением преломленного луча, и что оно должно свестись к постоянной

плюс произведение другой постоянной на квадрат синуса этого угла. Подставляя это выражение в два дифференциальных уравнения принципа наименьшего действия, мы приходим в точности к формулам закона Гюйгенса, из которых следует, что этот закон удовлетворяет одновременно и принципу наименьшего действия, и принципу живых сил; это не оставляет ни малейшего сомнения в том, что он порожден действием притягивающих и отталкивающих сил, влияние которых заметно только на неощутимых расстояниях. До сих пор этот закон был лишь результатом наблюдений, приближающимся к истине в пределах ошибок, которыми пока еще отягощены самые точные опыты. Теперь простота закона действия, от которого он зависит, позволяет рассматривать его как строгий.

Если взять за единицу скорость света в пустоте, скорость необыкновенно преломленного луча будет выражаться дробью, числитель которой — единица, а знаменателем является радиус эллипсоида Гюйгенса, по которому направлен свет. Скорость обыкновенного луча в кристалле постоянна во всех направлениях и равна единице, деленной на отношение синуса угла преломления к синусу угла падения. Опытным путем Гюйгенс узнал, что полуось вращения его эллипсоида почти в точности представляет это отношение, что связывает между собой оба вида преломления — обыкновенное и необыкновенное. Но принцип непрерывности показывает, что эта замечательная зависимость есть необходимый результат действия кристалла на свет и что этот результат зависит единственно от той причины, что обыкновенный луч превращается в необыкновенный, когда его положение изменяют соответствующим образом по отношению к оси нового кристалла. В самом деле, если этот луч перпендикулярен к грани этого кристалла, вырезанного перпендикулярно его оси, ясно, что бесконечно малый наклон оси к грани, полученной сечением, бесконечно близким к первому, достаточен, чтобы сделать из обыкновенного луча необыкновенный и наоборот. Этот наклон лишь на бесконечно малую величину может изменить действие кристалла и скорость проходящего в нем луча. Значит, это — скорость необыкновенного луча и, следовательно, она равна единице, деленной на полуось вращения эллипсоида. Таким образом, она вообще превосходит скорость обыкновенного луча, так как разность квадратов этих двух скоростей пропорциональна квадрату синуса угла, который ось образует с этим последним лучом. Эта разность представляет собой разность действия кристалла на эти два рода лучей. Она — наибольшая, когда луч, падающий на искусственную поверхность, проведенную через ось кристалла, находится в плоскости, перпендикулярной этой оси. Тогда необыкновенное преломление следует тому же закону, что и обыкновенное, только отношение синусов угла преломления и угла падения, которое в случае обыкновенного преломления равно половине малой оси эллипсоида, равно половине большой оси при необыкновенном преломлении.

По Гюйгенсу, скорость необыкновенного луча в кристалле выражается самим радиусом эллипсоида. Следовательно, его гипотеза не удовлетворяет принципу наименьшего действия. Но замечательно, что она

удовлетворяет принципу Ферма, следуя которому, свет проходит из одной точки, взятой вне кристалла, в другую — внутри кристалла в наименьшее возможное время, так как ясно, что этот принцип возвращает нас к принципу наименьшего действия, заменив выражение скорости на обратное. Идентичность закона Гюйгенса и принципа Ферма всегда имеет место, каким бы ни был сфероид, который в его гипотезе представляет скорость света внутри кристалла, так что эта гипотеза дает все законы преломления, которые могут быть выведены из сил притяжения и отталкивания. Но эллиптический сфероид удовлетворяет явлениям двойного преломления, наблюденным до настоящего времени. В этом случае, как в движениях и в фигурах небесных тел, природа, переходя от простого к сложному, заставляет эллиптические формы следовать за круговыми.

Закон отражения света от поверхностей прозрачных кристаллов выводится также из принципов наименьшего действия и живых сил. Но его можно связать с законом преломления путем следующих соображений. Какова бы ни была природа силы, заставляющей свет отражаться от поверхности тел, ее можно рассматривать как отталкивающую силу, которая отдает свету в обратном направлении скорость, которую она заставила его потерять, так же как упругость возвращает телам, в противоположном направлении, скорость, которую она погасила; в этом случае принцип наименьшего действия всегда остается в силе. Что касается обыкновенного или необыкновенного луча света, отраженного от внешней поверхности тела, этот принцип сводится к тому, что свет проходит из одного пункта в другой по наикратчайшему пути из всех тех, которые встречаются с поверхностью, так как в силу принципа живых сил его скорость одинакова до и после отражения. Как заметил Птолемей, условие кратчайшего пути придает равенство углам падения и отражения в плоскости, перпендикулярной к поверхности. Это общий закон отражения от внешних поверхностей тел.

Но когда свет, войдя в кристалл, разделился на обыкновенный и необыкновенный лучи, часть этих лучей отражается внутренней поверхностью при выходе из кристалла. Отражаясь, каждый из лучей, обыкновенный и необыкновенный, разделяется на два других таким образом, что один солнечный луч, попадая в кристалл, благодаря частичному отражению на его выходной поверхности образует четыре различных пучка, направления которых мы определим.

Предположим сперва, что грани входа и выхода, которые мы назовем *первой* и *второй*, параллельны. Дадим кристаллу неощутимую толщину, но все же большую, чем сфера заметного действия обеих граней. В этом случае на основании предыдущего рассуждения окажется, что четыре отраженных пучка составят вместе лишь один смешанный пучок, расположенный в плоскости падения исходного пучка и составляющий с первой гранью угол отражения, равный углу падения. Восстановим теперь у кристалла его толщину. Ясно, что в этом случае отраженные пучки после прохождения через первую грань примут направления, параллельные тем, какие они имели в первом случае. Поэтому эти пучки, а также плоскости падения исходного луча будут параллельны между собой. Но

только вместо того, чтобы перемешаться, как в первом случае, они будут разделены на тем большие расстояния, чем кристалл будет толще.

Теперь, если рассматривать какой-нибудь внутренний луч, выходящий частично из второй грани и частично отраженный ею в виде двух пучков, вышедший луч будет параллелен исходному лучу, так как свет, выходя из кристалла, должен принять направление, параллельное тому, которое он имел при входе, потому что вследствие сделанного предположения о параллельности входной и выходной граней он испытывает действие тех же сил, которые испытал при входе, но в обратном направлении. Вообразим в направлении вышедшего луча плоскость, перпендикулярную второй грани, и в этой плоскости представим себе вне кристалла прямую, проходящую через точку выхода и образующую с перпендикуляром к грани, но со стороны, противоположной направлению вышедшего луча, такой же угол, какой составляет это направление. Наконец, вообразим солнечный луч, входящий по этому направлению в кристалл. При входе этот луч разделится на два других, которые при выходе из кристалла через первую грань примут направления, параллельные солнечному лучу до его вхождения через вторую грань. Они будут параллельны направлениям двух отраженных пучков, что может быть только в том случае, если два луча, на которые разделяется солнечный луч при входе через вторую грань, соответственно, совместятся внутри кристалла с направлениями двух отраженных лучей. Формулы, относящиеся к необыкновенному преломлению, дают направления лучей, на которые разделяется солнечный луч. Поэтому они дадут также направления двух пучков, отраженных внутри кристалла.

Если две грани кристалла не параллельны, то по формулам необыкновенного преломления получим направления двух лучей, на которые разделяется исходный луч, проникая через первую грань. Затем по тем же формулам получим направления каждого из этих лучей при их выходе через вторую грань, откуда посредством изложенного выше построения определим направления двух солнечных лучей, проникающих в кристалл через вторую грань и образующих четыре луча с таким же направлением как направления четырех пучков исходного луча, отраженного этой гранью; эти направления будут заданы формулами необыкновенного преломления.

Таким образом, при помощи этих формул получим все явления отражения света поверхностями прозрачных кристаллов. Г-н Малю сделал множество соответствующих опытов, замечательное согласие которых с предыдущими формулами, выведенными из принципов наименьшего действия и живых сил, завершает доказательство того, что явления преломления и отражения света в этих кристаллах, — результат действия притягивающих и отталкивающих сил.

Кроме того, он наблюдал удивительное явление особого отражения света всеми телами, заключающееся в том, что под определенными для каждого из них углами падения весь отраженный свет становится поляризованным, в результате чего одно из двух отраженных изображений предмета, рассматриваемое при отражении света от его поверхности че-

рез призму из кристалла исландского шпата в плоскости его главного сечения, полностью исчезает. Оно появляется вновь вне этих границ угла падения. Только металлы как будто до сих пор были исключением из этого общего правила: изображения, которые должны были бы исчезнуть, лишь ослаблялись. Свет, поляризованный в направлении, противоположном тому, в котором полированная поверхность отражает свет всех других тел, полностью поглощается телом, когда он падает на поверхность под углом поляризации.

Как мы видели в книге II, аберрация звезд зависит от скорости их света в сочетании со скоростью Земли на орбите. Поэтому она не будет одинаковой для всех этих светил, если их лучи приходят к нам с разными скоростями. Учитывая малость аберрации, было бы трудно с ее помощью точно узнать эти различия. Но большое влияние скорости света на его преломление при вхождении в прозрачную среду дает очень точный метод для определения относительных скоростей световых лучей. Для этого перед объективом телескопа достаточно установить стеклянную призму и измерять получающиеся от этого отклонения в положениях звезд. Таким способом нашли, что скорости прямого и отраженного света от всех небесных и земных тел совершенно одинаковы. Опыты, которые по моей просьбе любезно провел г-н Араго, не оставляют никаких сомнений в этом физическом правиле, важном для астрономии тем, что оно доказывает правильность формул аберрации звезд.

Скорость света звезд относительно наблюдателя не одинакова во всех точках земной орбиты. Она наибольшая, когда ее направление противоположно движению Земли, и наименьшая, когда эти два движения совпадают. Хотя разница в относительной скорости свотового луча не превышает 1/5000 доли полной скорости, все же она может произвести заметные изменения в отклонении света, проходящего через призму. Так как очень точные опыты, сделанные г-ном Араго, не позволили их обнаружить, следует заключить, что относительная скорость однородного светового луча постоянна и, по-видимому, определена природой флюида, приводимого им в движение в наших органах зрения, чтобы произвести ощущение света. Это следствие указывается еще равенством скорости света, излучаемого звездами и земными предметами, равенством, которое без этого было бы необъяснимо. Разве не правдоподобно предположить, что светящиеся тела испускают бесконечное число лучей, наделенных разными скоростями, и что только лучи, скорость которых заключается в определенных пределах, обладают свойством возбуждать ощущение света, тогда как другие производят темную теплоту? Не так ли горячие тела становятся светящимися при возрастании теплоты? И превосходные опыты Гершеля с теплотой солнечного спектра не доказывают ли нам, что Солнце излучает горячие невидимые лучи, причем некоторые из них, менее преломляемые, чем даже красные лучи, представляются наделенными большей скоростью?

Явления двойного лучепреломления и аберрации света звезд, по-видимому, придают системе взглядов на излучение света если не полную достоверность, то, по меньшей мере, исключительную вероятность. Эти

явления необъяснимы при предположении о волновых колебаниях эфирного флюида. Удивительное свойство луча, поляризованного кристаллом, не делиться больше при прохождении второго кристалла, параллельного первому, очевидно указывает на то, что один и тот же кристалл оказывает различное действие на разные стороны молекулы света, движения которой, как мы видели, подчинены общим законам движения летящих тел.

Декарт первым опубликовал истинный закон обыкновенного преломления, который Кеплер и другие физики безуспешно искали. Гюйгенс в своей «Диоптрике» утверждает, что он видел этот закон, представленный в другой форме, в рукописи Снеллиуса и что, как ему сказали, он был сообщен Декарту, откуда, может быть, прибавляет он, этот последний и вывел постоянство отношения синусов углов преломления и падения. Но эта запоздалая претензия Гюйгенса в пользу своего соотечественника не представляется мне достаточной, чтобы отнять у Декарта заслугу открытия, которое никто не оспаривал при его жизни. Этот великий геометр вывел его из двух предположений: первого — скорость света, параллельная плоскости падения, не изменяется ни отражением, ни преломлением и второго — скорость различна в разных прозрачных средах, и больше в тех из них, которые сильнее преломляют свет. Отсюда Декарт заключил, что если при переходе из одной среды в другую, менее преломляющую, наклон световых лучей таков, что значение синуса угла преломления равно или больше единицы, то проломление меняется на отражение, причем углы отражения и падения между собой равны. Все эти выводы согласуются с природой, но доказательства, данные Декартом, не точны, и примечательно, что Гюйгенс и он благодаря неточной или ложной теории пришли к истинным законам преломления света. По этому вопросу у Декарта были долгие споры с Ферма, продолженные картезианцами после его смерти; эти споры предоставили Ферма счастливую возможность применить свой прекрасный метод максимумов и минимумов к выражениям с радикалами. Рассматривая этот предмет с метафизической точки зрения, он искал закон преломления на основании принципа, изложенного нами ранее, и был очень удивлен, придя к принципу Декарта. Но, найдя, что для удовлетворения его принципу скорость света должна быть меньше в прозрачных средах, чем в пустоте, тогда как Декарт считал ее большей, что казалось Ферма невероятным, он утвердился в мнении, что доказательства этого великого геометра были ошибочными.

В главе II третьей книги мы видели, как принцип Ферма привел к принципу наименьшего действия, применение которого к движению света в прозрачных кристаллических телах заставляет законы преломления и отражения света зависеть от законов действия этих тел на свет; это доказывает, что такого рода явления суть результат притягивающих и отталкивающих сил, и ставит закон Гюйгенса в ряд строго доказанных истин.

Внимательно изучая явления капиллярности, такие же разнообразные, как и движения света, я узнал, что и они, подобно последним, за-

висят от притягивающих сил, которые перестают быть ощутимыми при самых малых расстояниях, доступных нашим чувствам, и сумел на основании только этого свойства подвергнуть их строгому анализу. Рассмотрим сначала главные из этих явлений — поднятие и опускание жидкостей в очень узких трубках.

Если опустить в спокойную воду конец очень тонкой цилиндрической стеклянной трубки, вода поднимется в ней на высоту, обратно пропорциональную ее внутреннему диаметру. Если этот диаметр равен 1 мм и если внутренность трубки хорошо смочена, высота воды над уровнем будет около 30.5 мм при температуре 10°. Все жидкости демонстрируют подобные явления, но их поднятия неодинаковы: некоторые из них вместо того, чтобы подниматься, опускаются ниже уровня, но опускание всегда обратно пропорционально диаметру трубки. Для ртути это опускание в стеклянной трубке с внутренним диаметром в 1 мм близко к 13 мм. Трубки из мрамора или из других материалов дают результаты, аналогичные предыдущим: если они очень узкие, жидкости поднимаются или опускаются обратно пропорционально диаметру их полостей.

В трубках и, вообще, в капиллярных пространствах поверхность жидкости вогнута, если жидкость поднимается над уровнем, и выпукла, если опускается ниже его.

Все эти явления имеют место как в пустоте, так и на открытом воздухе. Следовательно, они не зависят от давления атмосферы. Поэтому они могут быть только результатом притяжения одних молекул жидкости другими, а также стенками, которые их заключают.

Большая или меньшая толщина стенок не оказывает никакого заметного влияния на эти явления. Поднятие и опускание жидкостей в капиллярных трубках всегда одинаковы, какова бы ни была эта толщина, если только одинаковы внутренние диаметры. Значит, цилиндрические слои, находящиеся на заметном расстоянии от внутренней поверхности, не участвуют в поднятии жидкости, хотя в каждом из них, взятом в отдельности, она должна была бы подниматься над уровнем. Естественно думать, что их действию не мешают промежуточные слои, которые ими охватываются, и что притяжения такого рода передаются через тела так же, как сила тяжести. В связи с этим действие заметно удаленных от внутренней поверхности трубки слоев исчезает только вследствие их отдаленности от жидкости, откуда следует, что действие тел на жидкости, как и на свет, заметно только на незаметных расстояниях.

Но притягивающая сила, производя капиллярные явления, действует совсем иным способом, чем при преломлении света. Это последнее явление обусловлено действием прозрачных сред, и когда они ограничены криволинейными поверхностями, можно, как мы видели, пренебречь действием мениска, отсекаемого плоскостью, касательной к этим поверхностям, тогда как капиллярные явления производятся действием этого мениска. В самом деле, если по оси стеклянной трубки, погруженной вертикально в сосуд, наполненный водой, вообразить бесконечно тонкий канал, изгибающийся в нижней части трубки и оканчивающийся далеко

от нее на поверхности воды в сосуде, действие воды в трубке на воду, содержащуюся в этом канале, будет меньше, чем действие воды в сосуде на воду, заключенную в другом конце канала. Разность определяется действием водяного мениска, отсекаемого плоскостью, касательной в самой низкой точке поверхности воды в трубке, действием, которое, очевидно, стремится приподнять жидкость в канале и поддерживать ее приподнятой в равновесии над ее уровнем. Поэтому для объяснения капиллярных явлений было необходимо знать действие подобных менисков. Подвергнув этот предмет математическому анализу, я пришел к такой основной теореме:

*во всех законах, где притяжение заметно только на незаметных расстояниях, аналитическое выражение действия жидкого тела, оканчивающегося изогнутой поверхностью, на внутренний бесконечно узкий канал, перпендикулярный к этой поверхности в любой точке, состоит из трех членов: первый, несравнимо превосходящий два других, выражает действие тела в предположении, что оно оканчивается плоскостью; второй есть дробь, числитель которой — постоянная, зависящая от интенсивности и закона притягивающей силы, а знаменатель — самый малый оскулирующий радиус поверхности в этой точке; третий член есть дробь, имеющая одинаковый числитель с предыдущей, а знаменателем — наибольший оскулирующий радиус в той же точке.*

Оскулирующие радиусы должны считаться положительными, если поверхность выпуклая, и отрицательными, если она вогнутая. Под действием тела на канал нужно подразумевать давление, которое жидкость, заключенная в канале, в силу притяжения этого тела оказывала бы на основание, расположенное внутри канала перпендикулярно его сторонам, если принять это основание за единицу.

С помощью этой теоремы и законов равновесия жидкостей можно легко получить дифференциальное уравнение фигуры, которую должна принять жидкая масса, заключенная в сосуде заданной формы под влиянием тяжести. Анализ приводит к уравнению с частными производными второго порядка, интеграл которого не берется никакими известными методами. Если фигура — тело вращения, уравнение сводится к обычным разностям и может быть интегрировано быстро сходящимися приближениями, когда поверхность очень мала. Таким путем находим, что в цилиндрических очень узких трубках поверхность жидкости тем больше приближается к сферическому сегменту, чем меньше внутренний диаметр трубки. Если в разных цилиндрических трубках из одинакового материала эти сегменты подобны, радиусы их поверхностей относятся как диаметры трубок; а это подобие сферических сегментов представляется очевидным, если принять во внимание малость расстояния, на котором действие трубки перестает быть ощутимым. Таким образом, если с помощью очень сильного микроскопа удалось бы его представить равным 1 мм, очень вероятно, что такая же сила увеличения дала бы диаметру трубки видимую величину в несколько метров. Поэтому внутренняя поверхность трубки может рассматриваться как почти плоская в радиусе, равном радиусу сферы ее заметного действия. Жидкость в этом

промежутке понижается или поднимается от этой поверхности, как если бы она была плоской. Поскольку жидкость вне этого предела подвержена лишь действию самой на себя, ее поверхность есть сферический сегмент, крайние касательные плоскости которого, будучи плоскостями жидкой поверхности на границах активного действия трубки, в разных трубках почти одинаково наклонены к их стенкам, откуда следует, что эти сегменты подобны.

Сопоставление этих результатов дает истинную причину поднятия и опускания жидкостей в капиллярных трубках обратно пропорционально их диаметрам.

Таким образом, когда жидкость поднимается в цилиндрической трубке, ее поверхность, становясь вогнутой, оказывает меньшее действие на канал, упоминавшийся выше, чем действие жидкости в сосуде на этот же канал. По предыдущей теореме, эта разность равна постоянной, деленной на радиус сферического сегмента, поверхность которого почти в точности соответствует поверхности жидкости. А так как сегменты в разных трубках подобны, их радиусы относятся как внутренние диаметры трубок. Следовательно, эта разность и поднятие жидкости над уровнем, причиной которого она является, обратно пропорциональны этим диаметрам.

Если поверхность внутренней жидкости выпукла, что имеет место для ртути в стеклянной трубке, действие жидкости на канал будет больше, чем действие жидкости в сосуде. Следовательно, в силу этой разности жидкость должна опуститься обратно пропорционально внутреннему диаметру трубки.

Поэтому с помощью наблюденного поднятия или опускания жидкости в цилиндрической капиллярной трубке известного диаметра можно определить их для такой же жидкости в капиллярной трубке любого диаметра. Но если трубка не цилиндрическая и если ее внутренняя поверхность есть некоторая вертикальная и прямая призма, каково будет опускание и поднятие жидкости в такой трубке? Решение этой проблемы как будто требует невозможного для современного анализа интегрирования уравнения по поверхности внутренней жидкости. К счастью, это уравнение, преобразованное особым образом, приводит к замечательному выводу, заключающему решение и объяснение многих капиллярных явлений: *каковы бы ни были форма и размеры призмы, объем жидкости, поднятой или пониженной капиллярным действием, пропорционален контуру внутреннего сечения горизонтальной плоскостью.* Это можно показать без математического анализа, если рассматривать явление капиллярности со следующей точки зрения.

Представим себе, что жидкость поднимается в прямой вертикальной призме; ясно, что это происходит под действием стенок трубки на жидкость и самой жидкости на себя. Первый слой жидкости, прилегающий к стенкам, поднимается этим действием, этот слой поднимает второй, тот — третий и т. д. до тех пор, пока вес поднятого объема жидкости не уравновесит притягивающие силы, которые стремятся поднять его еще больше. Чтобы определить этот объем в состоянии равновесия, во-

образим на нижнем конце трубки вторую идеальную трубку, стенки которой бесконечно тонки и являются продолжением внутренней поверхности первой трубки; эта трубка, не оказывая никакого действия на жидкость, не мешает взаимному действию первой трубки и жидкости. Предположим, что вторая трубка сначала имеет вертикальное положение, затем изгибается горизонтально и наконец снова занимает вертикальное положение, поднимаясь до поверхности жидкости и сохраняя по всей своей длине одинаковую форму и ширину. Ясно, что при равновесии жидкости давление в обеих вертикальных ветвях канала, составленного первой и второй трубками, одинаково. Но так как в первой вертикальной ветви, образованной первой трубкой и частью второй, жидкости больше, чем в другой вертикальной ветви, надо, чтобы возникающий избыток давления уничтожался вертикальными притяжениями призмы и жидкости, находящейся в этой первой ветви. Проанализируем внимательно эти притяжения.

Рассмотрим сначала те, которые имеют место около нижней части первой трубки. Если предположить, что призма — вертикальная и прямая, ее основание будет горизонтальным. Жидкость, заключенная во второй трубке, притягивается вертикально вниз: во-первых, сама собой, во-вторых, жидкостью, окружающей эту вторую трубку. Но оба этих притяжения уничтожаются такими же притяжениями, испытываемыми жидкостью, заключенной во второй вертикальной ветви канала, около поверхности уровня всей массы жидкости. Поэтому здесь их можно не принимать во внимание. Жидкость первой вертикальной ветви второй трубки притягивается вертикально еще жидкостью первой трубки, но это притяжение уничтожается притяжением, с которым она сама действует на эту последнюю жидкость. Поэтому и здесь снова эти два взаимных притяжения можно оставить без внимания. Наконец, жидкость второй трубки вертикально притягивается вверх первой трубкой, в результате чего появляется вертикальная сила, которую мы назовем *первой силой* и которая участвует в уничтожении избытка давления, вызванного поднятием жидкости в первой трубке.

Рассмотрим теперь силы, действующие на жидкость в первой трубке. В ее нижней части она испытывает следующие притяжения: во-первых, она притягивает сама себя; но взаимные притяжения тела не сообщают ему никакого движения, если оно твердое, поэтому, не нарушая равновесия, можно вообразить жидкость в первой трубке отвердевшей. Во-вторых, эта жидкость притянута лежащей ниже жидкостью второй трубки. Но мы видели, что взаимные притяжения этих двух жидкостей уничтожаются и нет надобности их учитывать. В-третьих, она притянута наружной жидкостью, окружающей вторую трубку; из этого притяжения возникает вертикальная сила, направленная вниз, которую мы назовем *второй силой*. Мы видим здесь, что если закон притяжения, зависящий от расстояния, одинаков для молекул первой трубки и для молекул жидкости, так что они отличаются только интенсивностью в одинаковых объемах, эти интенсивности относятся между собой как первая сила ко второй, так как внутренняя поверхность жидкости, окружающей

вторую трубку, — та же самая, что и внутренняя поверхность первой трубки. Поэтому две массы отличаются только своей толщиной, но поскольку притяжение масс делается незаметным на заметных расстояниях, разность в их толщине, если она ощутима, не оказывает никакого влияния на их притяжения. Наконец, в-четвертых, жидкость первой трубки притягивается вертикально вверх этой трубкой. В самом деле, вообразим эту жидкость разделенной на бесконечное число маленьких вертикальных колонн. Если через верхний конец одной из этих колонн провести горизонтальную плоскость, часть трубки ниже этой плоскости не создает никакой вертикальной силы в колонне, а следовательно, нет вертикальной силы, создаваемой этой трубкой, кроме силы, вызванной ее частью, лежащей выше плоскости, и ясно, что вертикальное притяжение этой части трубки на колонну такое же, как всей трубки на равную и подобным же образом расположенную колонну во второй трубке. Поэтому полная вертикальная сила, созданная притяжением первой трубки на жидкость, заключенную в ней, равна силе, созданной притяжением этой трубки на жидкость, заключенную во второй трубке. Следовательно, эта сила равна первой силе.

Объединяя все вертикальные притяжения, испытываемые жидкостью, заключенной в первой вертикальной ветви канала, получим вертикальную составляющую, направленную снизу вверх и равную удвоенной первой силе без второй. Эта равнодействующая должна уравновешивать избыток давления, вызванного весом столба жидкости, возвышающегося над ее уровнем. Поэтому она равна этому объему, умноженному на удельный вес жидкости.

Поскольку действие трубки имеет место только на неощутимых расстояниях, призма тоже действует только на колонны жидкости, крайне близкие к ее поверхности. Поэтому можно не учитывать кривизну ее стенок и рассматривать их как бы развернутыми в плоскость. И первая, и вторая силы тогда будут равны произведению ширины этой плоскости, или, что то же, периметра внутреннего основания трубки на постоянные коэффициенты, которые на основании предыдущего могут обозначать соответствующие интенсивности притяжения молекул трубки и жидкости при равенстве их объемов. Равнодействующая, о которой мы говорили, будет поэтому пропорциональна этому периметру; и, следовательно, объем поднятой жидкости также будет ему пропорционален.

Средняя из высот всех точек верхней поверхности этой жидкости над уровнем есть частное от деления ее объема на основание призмы. Поэтому эта высота пропорциональна периметру призмы, разделенному на ее основание.

Если призма представляет собой цилиндр, периметр ее основания пропорционален ее диаметру, а основание пропорционально квадрату диаметра. Поэтому средняя высота жидкости обратно пропорциональна диаметру. Когда призма очень узка, эта высота очень мало отличается от высоты самой низкой точки поверхности внутренней жидкости. Если жидкость смачивает стенки трубки, как спирт и вода смачивают стекло, эта поверхность очень близка к полусфере, и, исходя из этого, легко

прийти к выводу, что для получения ее средней высоты над уровнем надо к высоте ее самой низкой точки прибавить 1/6 диаметра трубки. Эта последняя высота, исправленная таким образом, обратно пропорциональна диаметру трубки. Г-н Гей-Люссак подтвердил эти теоретические результаты большим числом опытов, проделанных с величайшей тщательностью и очень точными методами с водой, спиртом различной плотности, эфирными маслами и т. д.

Постоянное отношение объема поднявшейся жидкости к периметру основания существует даже в том случае, когда кривизна его прерывиста, например когда этот контур — прямолинейный многоугольник, так как это отношение может быть нарушено только действием трубки около ее краев и только на протяжении, равном сфере заметного действия молекул. Поскольку это пространство неощутимо, ошибка должна быть совершенно нечувствительной. Поэтому указанное выше отношение можно распространить на призмы с любыми основаниями. Если эти основания подобны, они пропорциональны квадратам гомологичных линий, и их периметры пропорциональны этим линиям. Периметры, деленные на соответствующие им основания, а следовательно, средние высоты поднявшейся жидкости, обратно пропорциональны этим линиям.

Когда контуры оснований являются многоугольниками, описанными вокруг одного и того же круга, основания равны произведениям периметров этих контуров на полурадиус окружности. Поэтому отношения контуров к основаниям одинаковы и равны единице, деленной на этот полурадиус. Следовательно, средние высоты поднятия жидкости во всех этих трубках одинаковы.

Если основание призмы — прямоугольник, у которого две стороны очень большие, а другие очень маленькие, отношение периметра к основанию будет близко к единице, деленной на половину маленькой стороны. Если основание — окружность, у которой эта маленькая сторона является радиусом, отношение контура к основанию такое же, как и в предыдущем случае. Поэтому среднее поднятие жидкости в этих двух случаях одинаково. Первый случай весьма близок к тому, когда две параллельные плоскости погружены нижними частями в жидкость. Таким образом, средняя высота жидкости между двумя параллельными плоскостями равна этой высоте в цилиндрической трубке с внутренним радиусом, равным расстоянию между плоскостями, что полностью согласуется с опытами.

Если поместить призму вертикально в другую призму, вертикальную и пустую внутри, и погрузить их нижние концы в жидкость, объем этой жидкости, поднявшейся между внешней поверхностью внутренней призмы и внутренней поверхностью наружной призмы, пропорционален сумме периметров обоих оснований: одного — внутреннего и другого — внешнего. Эта теорема может быть легко доказана предыдущим методом. Отсюда следует, что если основания — подобные многоугольники, средняя высота поднявшейся между призмами жидкости такая же, как в подобной им призме, у которой каждая сторона внутреннего основания равна разности соответствующих сторон оснований.

Если полая призма, опущенная нижним концом в жидкость, наклонена к горизонту, объем поднявшейся над ее уровнем жидкости, умноженный на синус угла наклона граней призмы, постоянно один и тот же, каков бы ни был этот наклон. В самом деле, это произведение выражает вес поднявшегося объема жидкости, разложенный параллельно сторонам призмы. Этот разложенный таким образом вес должен уравновешивать действие призмы и внешней жидкости на жидкость, содержащуюся в призме, действие, которое, очевидно, одинаково при всех наклонах призмы. Поэтому вертикальная средняя высота поднявшейся жидкости всегда одинакова.

Из сказанного следует, что если удвоенное действие притягивающей силы трубки на жидкость меньше, чем у жидкости самой на себя, выражение объема жидкости, поднятой выше уровня, становится отрицательным, т. е. поднятие сменяется тогда понижением, но и при этом изменении предыдущие выводы продолжают быть действительными. Таким образом, понижение жидкости в цилиндрических трубках обратно пропорционально их диаметрам.

Угол, составленный пересечением поверхностей внутренней жидкости и трубки, изменяется с напряженностью их притягивающих сил. Анализ приводит к такой теореме:

*сила притяжения жидкости трубкой равна силе притяжения жидкостью самой себя, умноженной на квадрат косинуса половины угла между нижней частью стенок трубки и плоскостью, касающейся поверхности жидкости на вершине сферы заметной активности трубки, угла, отличного от того, который образуют стенки с этой поверхностью непосредственно в точке их соприкосновения.* Этот угол равен нулю, если напряжение притягивающей силы трубки равно напряжению притягивающей силы жидкости, и тогда в очень узкой цилиндрической трубке поверхность жидкости очень близка к поверхности полусферы. Угол становится прямым, и поверхность жидкости — плоскостью, если первое из напряжений составляет лишь половину второго. Наконец, этот угол равен двум прямым, и поверхность жидкости делается выпуклой полусферой, если притягивающая сила трубки неощутима по сравнению с притягивающей силой жидкости. Таким образом, измерение этого угла дает отношение этих сил, если первая не превосходит вторую.

В том случае, если притягивающая сила трубки на жидкость превосходит силу, с которой жидкость притягивается сама, очень тонкий слой жидкости прилегает к стенкам трубки и образует внутреннюю трубку, поднимающую жидкость, поверхность которой вследствие этого делается вогнутой полусферой. Так ведут себя в стеклянной трубке вода, спирт и масла.

Около окончания стенок трубки и в пределах сферы заметного активного действия притяжение ее верхней части изменяется и непрерывно уменьшается по мере приближения жидкости к ее окончанию, и рассматриваемый нами угол сильно изменяется. Так, погружая все больше и больше стеклянную капиллярную трубку в спирт, видим, что поднятие внутренней жидкости над уровнем остается неизменным до тех пор, пока

она не доходит до конца трубки. Тогда, продолжая погружать трубку, увидим, что поверхность спирта становится все менее вогнутой и делается плоской, когда верхний конец трубки подходит к поверхности жидкости.

Похожее явление наблюдается и тогда, когда в стеклянную капиллярную трубку, открытую с обоих концов и удерживаемую вертикально, постепенно наливают спирт. Жидкость опускается к нижнему концу трубки. Верхняя поверхность колонки остается все время вогнутой полусферой. Нижняя поверхность тоже вогнута, но эта вогнутость становится все меньше и меньше по мере наливания спирта и увеличения длины его столбика. Когда эта длина делается равной высоте, обусловливаемой капиллярностью, т. е. высоте, на которую жидкость в трубке поднялась бы над уровнем, если бы трубка была погружена своим нижним концом в бесконечный сосуд, наполненный этой жидкостью, нижняя поверхность колонки становится плоской. Продолжая наливать спирт, видим, что эта поверхность становится все более и более выпуклой, если сцепление воздуха с основанием трубки или какая-нибудь другая причина мешают этому основанию смачиваться жидкостью. Когда эта поверхность становится выпуклой полусферой, длина колонки равна удвоенной высоте, обусловленной капиллярностью. В самом деле, в поддержании этой колонки участвуют всасывание, производимое вогнутостью ее верхней поверхности, и давление, производимое выпуклостью ее нижней поверхности. На основании ранее сказанного эти силы одинаковы, и первая из них достаточна, чтобы поддерживать жидкость на высоте, обусловленной капиллярностью. Если продолжать наливать спирт, жидкая капля удлиняется и разрывается в тех точках ее поверхности, где радиус кривизны от этого удлинения возрастает. В этом случае капля распространяется на нижнее наружное основание трубки, где образует новую каплю, которая делается все более и более выпуклой до тех пор, пока не примет форму полусферы, радиус которой равен внешнему диаметру трубки. Тогда, если столб жидкости, длина которого уменьшилась, когда первая капля жидкости растеклась по основанию трубки, находится в равновесии, его длина равна сумме поднятий жидкости, которые имели бы место при двух погруженных в эту жидкость стеклянных трубках, внутренние радиусы которых были бы равны: один — как у первой трубки, другой — как наружный радиус той же трубки. Все эти выводы теории были подтверждены опытом.

Рассмотрим теперь бесконечный сосуд, заполненный разными жидкостями, расположенными горизонтально одна над другой. *Если погрузить вертикально нижний конец прямой призматической трубки, избыток веса жидкостей, содержащихся в трубке, над весом жидкостей, которые она заключает без действия капиллярности, таков же, как вес жидкости, которая поднялась бы над ее уровнем, если бы жидкость, в которую опущен нижний конец трубки, была единственной.*

Действительно, действие призмы и этой жидкости на ту же жидкость, заключенную в трубке, очевидно, такое же, как и в последнем случае. Так как другие жидкости, содержащиеся в призме, заметно поднимаются

над ее нижним основанием, действие призмы на каждую из них не может их ни поднять, ни опустить; что касается взаимного действия этих жидкостей одних на другие, то оно уничтожилось бы, очевидно, если бы они все вместе образовали твердую массу, что можно предположить, не нарушая равновесия.

Отсюда следует, что если призматическую трубку нижним концом опустить в жидкость и затем налить в нее другую жидкость, поверх первой, вес жидкостей, заключенных в трубке, будет таким же, каким был вес жидкости, заключенной вначале. Поверхность верхней жидкости будет такой, какую она приняла бы в трубке, опущенной своим нижним концом в эту жидкость. В точке соприкосновения двух жидкостей они будут иметь общую поверхность, отличную от той, которую они имели бы в отдельности и которую можно определить путем анализа. Если смочить водой, спиртом или любой другой жидкостью, смачивающей именно стекло, внутренность капиллярной цилиндрической трубки из этого материала и опустить нижний конец этой трубки в ртуть, увидим, что часть жидкости, увлажняющей стенки трубки, соберется в колонку поверх ртути. Из анализа, примененного к этому предмету, следует, что общая поверхность ртути и жидкости будет полусферой, выпуклой у ртути, причем угол, составленный ее поверхностью со стенками трубки, будет равен нулю.

Предположив, что бесконечный сосуд содержит две жидкости, *вообразим, что полностью опускаем в них прямую вертикальную призму так, чтобы она находилась в одной из них своей верхней частью, а в другой — нижней частью. Вес нижней жидкости, поднятой в призме капиллярным действием над ее уровнем в сосуде, будет равен весу такого же объема верхней жидкости плюс вес нижней жидкости, которая поднялась бы в призме над уровнем, если бы в сосуде была только эта жидкость, минус вес верхней жидкости, которая поднялась бы в той же призме над уровнем, если бы эта жидкость только одна была в сосуде, а призма своей нижней частью была бы погружена в эту жидкость.*

Для доказательства этого заметим, что действие призмы и нижней жидкости на содержащуюся в призме часть нижней жидкости такое же, как если бы эта жидкость только одна находилась в сосуде. Поэтому в обоих случаях эта жидкость стремится вертикально вверх одинаковым образом, и очевидно, что увлекающие ее силы в этом последнем случае эквивалентны весу объема той жидкости, который поднялся бы над ее уровнем. Подобным же образом верхняя жидкость, содержащаяся в верхней части призмы, под действием призмы и самой жидкости стремится вертикально вниз так же, как она стремилась бы вверх, если бы сосуд заключал только эту жидкость, а призма погружалась в нее своим нижним концом. В этом случае объединенное действие призмы и жидкости эквивалентно весу этой жидкости, которая поднялась бы над ее уровнем. Наконец, столб жидкостей внутри призмы увлекается вертикально вниз своим собственным весом и вверх — давлением внешних жидкостей. Объединив все эти силы, которые должны уравновеситься, получим теорему, которую мы сформулировали выше. На основании тех же прин-

ципов можно определить, что должно быть, если сосуд наполнен любым числом жидкостей.

Поднятие и опускание жидкостей в капиллярных трубках изменяется с температурой из-за того, что теплота вызывает изменения в диаметре трубок и главным образом в плотности жидкостей. Относительно таких жидкостей, как спирт, обладающих совершенной текучестью, имеем следующую общую теорему:

*поднятие жидкости, вполне смачивающей стенки капиллярной трубки при разных температурах, прямо пропорционально плотности жидкости и обратно пропорционально внутреннему диаметру трубки.*

Прилагая изложенную выше теорию к понижению ртути в барометрах, можно составить таблицу понижений, соответствующих различным диаметрам их трубок и, таким образом, сделать сравнимыми между собой эти приборы, столь ценные для астрономии, физики и геодезии.

Одно из самых больших достоинств математических теорий (и самый лучший способ установить их достоверность) заключается в том, что они объединяют множество явлений, кажущихся разрозненными, и определяют их взаимные отношения не путем неопределенных и гадательных рассуждений, а точным расчетом. Так, закон всемирного тяготения связывает морские приливы и отливы с законами эллиптического движения планет. Подобным образом предыдущая теория связывает прилипание дисков к поверхности жидкостей, так же как и притяжение и отталкивание мелких тел, плавающих на этой поверхности, — с поднятием тех же жидкостей в капиллярных трубках.

Если к поверхности жидкости приложить диск, подвешенный к коромыслу очень точных весов таким образом, чтобы он поднимался вертикально с помощью очень маленьких гирек, постепенно и осторожно прибавляемых на чашу другого плеча коромысла, мы увидим, что диск поднимается понемногу над поверхностью уровня жидкости, приподнимая столб жидкости. При дальнейшем прибавлении гирь диск наконец отрывается от этого столба, который падает на поверхность жидкости. Вес, необходимый для этого отделения, может быть выведен из поднятия жидкости в капиллярной цилиндрической трубке, сделанной из материала диска. Представим себе, что этот диск — большого диаметра. Приподнятый столб жидкости принимает тогда форму тела вращения, нижнее основание которого бесконечно простирается по поверхности жидкости, а верхнее основание равно нижней поверхности диска. Теория капиллярного действия дает дифференциальное уравнение поверхности этого столба. Эта поверхность вогнута и в силу своей вогнутости поддерживается подвешенной в равновесии, так как если через какую-нибудь точку поверхности этого столба представить себе бесконечно узкий канал, сперва горизонтальный, а затем изгибающийся вертикально вниз и продолженный до нижней поверхности уровня жидкости, ясно, что жидкость, заключенная в вертикальной ветви этого канала, будет поддерживаться всасыванием, вызванным вогнутостью поверхности столба, так же как вода, поднятая в капиллярной трубке из стекла, поддерживается в равно-

весии по этой же причине. Анализ показывает, что вес приподнятого столба жидкости, которому должна быть равна сумма грузов, положенных на противоположную чашку весов, чтобы удержать его, равен весу цилиндрического столба жидкости, который должен иметь: 1) высоту, равную квадратному корню из произведения среднего поднятия жидкости в цилиндрической трубке из материала диска на диаметр трубки, разделенный на косинус угла, составленного нижней частью стенок этой трубки с плоскостью, касательной к поверхности жидкости на границе сферы заметного активного действия трубки, угла, который мы назовем *предельным углом*; 2) основание, равное нижней поверхности диска, умноженной на косинус половины угла, который эта поверхность образует с плоскостью, касающейся поверхности столба жидкости на конце сферы заметной активности диска. Этот последний угол, сперва равный двум прямым, уменьшается по мере того, как последовательное прибавление грузов приподнимает диск, примерно так же, как он увеличивается в капиллярной трубке, которую продолжают погружать в жидкость, уже достигнувшую верхнего конца. Если нижней поверхностью диска разделить цилиндр, о котором мы говорили, получим поднятие диска над уровнем жидкости. Измерение этого поднятия позволит узнать соответствующий ему угол, образованный поверхностями диска и жидкости. В момент отрыва диска от столба жидкости этот угол делается равным предельному углу. Если жидкость смачивает диск, предельный угол равен нулю, и поверхность столба жидкости в момент своего отделения представляется горлышком блока [желобком каннелюры], самая узкая часть которого приблизительно равна 0.7 высоты столба жидкости. Г-н Гей-Люссак сделал очень точные опыты с прилипанием диска к поверхности большого числа разных жидкостей. Эти опыты при сравнении с изложенной выше теорией замечательным образом согласуются с ней и не оставляют никакого сомнения в ее правильности.

Эти эксперименты могут служить для определения соотношения сил, притягивающих разные вещества к одной и той же жидкости. Сделав из этих веществ очень толстые диски равного диаметра и прилагая их к поверхности безграничной массы этой жидкости, путем анализа находим, что интенсивности этих притяжений при равных объемах, соответственно, пропорциональны квадратам веса грузов, необходимых, чтобы оторвать диски от жидкости. Когда сила, притягивающая диск к жидкости, превышает силу притяжения жидкости к самой себе, опыт позволяет узнать только эту последнюю силу, так как тогда жидкая пленка сильно прилипает к нижней поверхности диска и образует новый диск, который и поднимает жидкость. По этой причине все диски одинаковой формы и величины, сделанные из различных смачиваемых водой материалов, таких как стекло, мрамор и металлы, одинаково прилипают к этой жидкости. Но в случае, если притяжение диска меньше, трение жидкости о диск и ее вязкость вносят большие различия в результаты опытов по сцеплению ее с поверхностью диска. Г-н Гей-Люссак обнаружил это в тех опытах, которые он провел, изучая сцепление стеклянного диска со ртутью. На основании ранее сказанного максимум этого сцепления с большой точ-

ностью пропорционален синусу половины острого угла, образуемого верхней поверхностью степок стеклянной трубки, вертикально погруженной в эту жидкость, с плоскостью, касательной к поверхности этой жидкости на конце сферы заметной активности трубки. Из ежедневных наблюдений барометра мы знаем, что этот угол может значительно возрастать, когда ртуть очень медленно опускается, так как вязкость ртути и ее трение о стенки трубки мешают опусканию частиц жидкости, соприкасающихся со стенками. Эти же причины мешают столбу ртути отделиться от диска. Это отделение не имеет места непосредственно между поверхностями диска и жидкости, как было бы, если бы ртуть составляла твердую массу. Тогда пришлось бы употребить несравненно большую силу, чем сила, которая производит это отделение. Но при поднятии диска жидкий столб начинает отрываться с краев. Затем он отступает все больше и больше к середине диска до того момента, когда от него отрывается. Трение ртути о нижнюю поверхность диска и ее вязкость должны мешать этому и увеличивать, как при опускании барометра, острый угол соприкосновения поверхности диска с поверхностью ртути, поэтому если из-за исключительной медленности, с которой прибавляют мелкие гирьки на чашку весов, все молекулы жидкого столба имеют достаточно времени, чтобы приспособиться к новому состоянию равновесия, соответствующему этому углу, легко понять, что можно сильно увеличить вес, необходимый для отрыва диска от поверхности ртути.

Притяжение и отталкивание маленьких тел, плавающих на поверхности жидкости,— вот еще капиллярные явления, которые можно подвергнуть анализу. Вообразим две параллельные плоскости, сделанные из одинакового материала и вертикально погруженные своими нижними концами в безграничную жидкость. Предположим сперва, что эта жидкость опускается между ними. Ясно, что между плоскостями это понижение будет значительнее, чем снаружи от них, и тем больше, чем больше эти плоскости сближены. В силу этой разности плоскости, очевидно, будут придавлены одна к другой наружной жидкостью. Получается тот же эффект, если жидкость поднимается между плоскостями. Чтобы это показать, вообразим во внутренней жидкости бесконечно узкий вертикальный канал, проходящий через самую низкую точку ее поверхности, и предположим, что этот канал изгибается горизонтально, чтобы закончиться в точке внутренней поверхности одной из плоскостей, более поднятой, чем наружная жидкость. Эта точка будет испытывать в первую очередь давление атмосферы, а затем давление жидкости, содержащейся в вертикальной ветви канала. Но эти давления уменьшаются действием жидкого мениска, который отсекается касательной плоскостью в самой нижней точке поверхности внутренней жидкости, и это действие уравновешивается весом всего столба жидкости, содержащейся в вертикальной ветви канала, если предположить, что она продолжается до поверхности уровня неограниченной жидкости. Поэтому, внутренняя точка плоскости испытывает давление, меньшее атмосферного, которое прижимает соответствующую внешнюю точку. Эта разность давлений стремится сблизить обе плоскости. Анализ приводит к такой теореме:

*независимо от того, поднимается или опускается жидкость между плоскостями, давление, которое каждая плоскость оказывает на другую, равно весу жидкой призмы, высота которой есть полуразность поднятия крайних точек контакта с жидкостью внутри и снаружи плоскости, а основание есть часть плоскости, заключенной между горизонтальными линиями, проведенными через эти точки.* Отсюда следует, что когда плоскости очень сближены, их стремление соединиться возрастает в отношении, обратном квадрату их взаимного расстояния. Таким образом, с помощью промежуточной жидкости силы, действие которых чувствительно только на неуловимых расстояниях, производят силу, действующую на заметных расстояниях, по закону всемирного тяготения.

Если две плоскости сделаны из таких различных материалов, что жидкость понижается снаружи от одной из них в такой же степени, как поднимается снаружи от другой, они взаимно отталкиваются. Поверхность жидкости между ними будет иметь горизонтальную линию перегиба на уровне поверхности наружной жидкости. Внутри жидкость будет меньше поднята около плоскости, которая ее поднимает, чем снаружи. Однако мы видели, что тогда давление больше с той стороны, где жидкость поднята меньше. Подобно этому, поскольку жидкость больше понижена снаружи от плоскости, которая ее понижает, чем с внутренней стороны этой плоскости, внутреннее давление больше; поэтому обе плоскости стараются отдалиться одна от другой, и это стремление имеет место, каково бы ни было их сближение. Иначе обстоит дело, если есть разница между поднятием жидкости снаружи от одной из плоскостей и ее опусканием снаружи — от другой. Анализ показывает, что они начинают с отталкивания, но если продолжать их сближать, это отталкивание сменяется притяжением, которое возрастает по мере их взаимного сближения, причем жидкость внутри них безгранично поднимается или опускается. Во всех случаях, отталкиваются ли плоскости или притягиваются, поскольку они действуют одна на другую только через капиллярность, действие всегда равно противодействию. Опыт подтвердил эти выводы теории.

Наконец, взвешенное состояние тел на поверхности жидкости с меньшим удельным весом, чем у этих тел, также является капиллярным явлением, которое можно подвергнуть анализу. Оно может иметь место только тогда, когда эти тела своим капиллярным действием оттесняют жидкость. Тогда, как можно себе представить, для равновесия они должны возмещать своим весом вес оттесненной жидкости. В общем случае возрастание веса тела любой формы, вызванное капиллярным действием, равно весу объема жидкости, которую оно поднимает над уровнем благодаря этому действию, а если жидкость выдавлена вниз, возрастание веса сменяется уменьшением, и тогда вес уравновешенного тела равен весу объема жидкости, подобного тому, что был вытеснен телом, в связи с тем, что оно занимает пространство под уровнем, либо потому, что оно оставляет часть пространства пустым, оттесняя жидкость капиллярным действием.

Этот принцип включает известный в гидростатике принцип уменьшения веса тел, погруженных в жидкость. Чтобы это понять, достаточно ис-

ключить то, что относится к капиллярному действию, которое полностью исчезает, если тело вполне погружено в жидкость под ее уровнем. Для доказательства этого вообразим вертикальный канал, достаточно широкий, чтобы охватить тело и весь ощутимый объем жидкости, который оно своим капиллярным действием поднимает или оставляет пустым. Предположим, что этот канал, войдя в жидкость, становится горизонтальным и затем вновь поднимается вертикально до поверхности жидкости, все время сохраняя свою ширину. Ясно, что веса, заключенные в двух вертикальных ветвях этого канала, в состоянии равновесия должны быть одинаковы. Следовательно, необходимо, чтобы тело, благодаря своей относительной легкости, компенсировало вес поднятой капиллярным действием жидкости или, если это действие его вдавливает, надо, чтобы своей относительной тяжестью оно компенсировало произведенную этим пустоту. В первом случае действие капиллярности стремится погрузить тело в жидкость, во втором случае это действие приподнимает тело, которое благодаря этому, обладая даже большим удельным весом, может держаться на поверхности жидкости.

Именно таким образом цилиндр из очень тонкой стали, контакт которого с водой предотвращен лаковым покрытием или обволакивающим его слоем воздуха, держится на поверхности этой жидкости. Если два одинаковых и параллельных цилиндра поместить горизонтально на воде с таким расчетом, чтобы они соприкасались, но один выступал из-за другого, они немедленно начинают скользить один вдоль другого, чтобы стать своими концами на одном уровне. Так как жидкость больше сжата у того конца цилиндра, который соприкасается с другим цилиндром, чем у противоположного конца, основания этих последних испытывают большее давление, чем два других. Вследствие этого каждый цилиндр все больше и больше стремится соединиться с другим; так как ускоряющие силы всегда выносят систему тел, выведенную из равновесия, за пределы этого состояния, два цилиндра должны попеременно обгонять один другого, делая колебания, постепенно уменьшающиеся из-за испытываемого ими сопротивления и наконец прекращающиеся. Тогда, придя в состояние покоя, эти цилиндры своими концами оказываются на одном уровне.

Явления, представляемые жидкой каплей, находящейся в движении или висящей в равновесии, будь то в конической капиллярной трубке или между двумя немного наклоненными одна к другой плоскостями, у которых пересечение горизонтально, очень пригодны для проверки теории. Маленький столбик воды или спирта в конической стеклянной трубке, открытой с обоих концов и удерживаемой горизонтально, перемещается к вершине трубки; и мы видим, что это так и должно быть. В самом деле, поверхность жидкого столба вогнута на обоих этих концах. Но радиус этой поверхности меньше со стороны вершины, чем со стороны основания. Поэтому действие жидкости самой на себя меньше со стороны вершины, и, следовательно, столб жидкости должен стремиться в эту сторону. Если жидкость — ртуть, поверхность выпукла, и ее радиус также меньше у вершины, чем у основания, но вследствие выпуклости

действие жидкости на саму себя больше у вершины, и столб жидкости должен перемещаться к основанию трубки, что согласуется с экспериментами.

Можно уравновешивать эти действия жидкости самой на себя собственным весом столба жидкости и поддерживать ее в равновесии, наклоняя ось трубки к горизонту. Очень простой подсчет позволяет видеть, что если длина столба жидкости незначительна и если трубка очень узкая, синус угла наклонения оси к горизонту в случае равновесия почти в точности обратно пропорционален квадрату расстояния от середины столба жидкости до вершины конуса и равен дроби, у которой знаменатель равен этому расстоянию, а числитель — высоте, на которую жидкость поднялась бы в цилиндрической трубке, у которой диаметр был бы равен диаметру конуса в середине столба. Подобные же выводы имеют место для жидкой капли, помещенной между двумя плоскостями, соприкасающимися своими краями, которые предполагаются горизонтальными, причем плоскости образуют между собой угол, равный углу между осью конуса и его сторонами. Чтобы капля находилась в равновесии, наклон к горизонту плоскости, разделяющей на равные части угол, образованный плоскостями, должен быть таким же, как у оси конуса. Опыты, относящиеся к этому вопросу, подтверждают выводы теории.

Форма жидкостей, заключенных между плоскостями, составляющими между собой произвольный угол, фигура жидких капель, опирающихся на плоскость, истечение жидкостей из капиллярных сифонов и множество других подобных явлений, как и предыдущие, были подвергнуты анализу. Согласие его результатов с опытами неоспоримо доказывает существование во всех телах уменьшающегося с исключительной быстротой молекулярного притяжения, которое, модифицируясь в жидкостях формой содержащих их узких пространств, производит все явления капиллярности.

Поскольку эти явления были приведены к одной математической теории, для точного сравнения ее с природой было необходимо иметь серию очень точных опытов. Необходимость в таких опытах дает себя чувствовать по мере того, как физика, совершенствуясь, входит в область анализа. Тогда сравнением опытов с теориями эти теории можно поднять на самую высокую ступень достоверности, возможную для физических наук. Опыты с явлениями капиллярности, которые по моей просьбе проделал г-н Гей-Люссак, придав им всю точность астрономических наблюдений, обеспечили это преимущество теории, которую мы изложили.

Когда мы дошли до истинной причины явлений, любопытно бросить взгляд назад и рассмотреть, в какой мере к ней приближаются гипотезы, придуманные для их объяснения. Ньютон уделил много внимания явлениям капиллярности в вопросах, которыми заканчивается его «Оптика». Он очень хорошо видел, что эти явления зависят от притягивающих сил, убывающих с расстоянием с необычайной быстротой; и то, что он говорит о химических сродствах, производимых ими, очень достопримечательно для его времени и было в большой части подтверждено работами современных химиков. Но этот великий геометр не дал метода, позволяю-

щего подвергнуть явления капиллярности, вызываемые этими силами, математическому расчету. Затем Жюрен попробовал привести к общему принципу поднятие жидкостей в очень узких капиллярных трубках. Он приписывал поднятие воды в стеклянной трубке притяжению кольцеобразной части трубки, с которой соприкасается вода, «так как, — говорил он, — только от этой части трубки вода должна удаляться, опускаясь; следовательно, только она силой своего притяжения противодействует опусканию. Эта причина пропорциональна своему эффекту, потому что эта окружность и подвешенный столб воды — оба пропорциональны диаметру трубки». Но принцип пропорциональности следствия причине следует применять только тогда, когда причины первичны, а не тогда, когда они являются результатами первичных причин. Таким образом, даже принимая, что только стеклянное кольцо, примыкающее к поверхности воды, является причиной этого поднятия жидкости, мы не должны отсюда заключать, что поднятый вес должен быть пропорционален его диаметру, так как невозможно узнать силу этого кольца иначе, как суммируя силы всех его частей. Клеро, который исследовал этот вопрос в своей «Теории фигуры Земли», заменяет гипотезу Жюрена точным анализом всех сил, поддерживающих столб поднятой воды в состоянии равновесия в бесконечно узком канале, проходящем через ось трубки. Но он не объяснил главное явление капиллярности, а именно — явление поднятия и опускания жидкости в обратном отношении к внутреннему диаметру очень узких трубок. Не приводя доказательств, он ограничился лишь замечанием, что бесконечное число законов притяжения может произвести это явление. Предположение, которое он делает о действии стекла, ощутимом даже для молекул воды, расположенных на оси трубки, должно было отдалить его от истинного объяснения явления. Но замечательно, что если бы он исходил из гипотезы незаметного притяжения на заметных расстояниях и если бы он применил к молекулам, расположенным в сфере активности частей трубки, анализ сил, которые он использовал для молекул оси, он пришел бы не только к выводам Жюрена, но еще и к тем, которые мы получили с помощью второго способа, каким мы рассматривали капиллярные явления. По этому методу видно, что если жидкость полностью смачивает трубку, можно представить себе, что часть трубки, лежащая выше поверхности жидкости на неуловимую величину, заставляет ее подниматься и поддерживает ее подвешенной в равновесии, когда вес поднятого столба жидкости уравновешивает притяжение этого кольца трубки. Это происходит не так, как утверждает Жюрен, что само кольцо в соприкосновении с водой создает эти явления, так как его действие горизонтально. Эти явления доказывают, что взаимное действие трубки и жидкости не ограничивается поверхностями. Но принцип Жюрена, хотя и неточный, привел его к правильному выводу, а именно, что вес столба жидкости пропорционален периметру внутреннего сечения трубки, выводу, который мы должны распространить на призматическую трубку, какова бы ни была ее внутренняя форма и отношение притяжения жидкости ее молекулами к притяжению молекулами жидкости самих себя.

Сходство поверхностей жидкостей, заключенных в капиллярных пространствах, и жидких капель — с поверхностями, которыми геометры занимались при возникновении исчисления бесконечно малых под названием «криволинейных» и «упругих», естественно, побудило многих физиков рассматривать жидкости как бы обернутыми такими поверхностями, которые своим натяжением и эластичностью придавали жидкостям формы, наблюдаемые в опытах. Сегнер, которому одному из первых пришла эта идея, хорошо чувствовал, что она была лишь допущением, способным представить явления, но это допущение следует применять, только поскольку оно связывается с законом незаметного притяжения на заметных расстояниях. Поэтому он попробовал установить эту зависимость. Но, следуя за его рассуждениями, легко обнаружить в них неточность, и результаты, к которым он пришел и которые не согласуются ни с анализом, ни с природой, служат этому доказательством. Впрочем, по замечанию в конце его изыскания, мы видим, что он и сам не был ими доволен. Но надо отдать ему справедливость в том, что он был на пути, который должен был привести его к общей теории капиллярных явлений. В то время, когда я ею занимался, Томас Юнг проводил искусные изыскания на эту же тему, включенные в «Философские труды». Подобно Сегнеру он сравнивает капиллярную силу с натяжением жидкой поверхности, учитывая ее кривизну в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и, кроме того, предполагает, что эта поверхность всегда пересекает стенки капиллярного пространства под определенным углом для одинаковых веществ, каковы бы ни были к тому же поверхности этих стенок, что правильно только в пределах сферы заметной активности этих веществ и, как мы видели по отношению к поверхности трубок и дисков, поднимающих жидкость, прекращается за этими пределами, когда жидкость находится у края стенок. Но Юнг, так же как и Сегнер, не пытался вывести свои гипотезы из молекулярного притяжения, что было необходимо для того, чтобы они стали реальными; а они могли стать такими только путем доказательств, подобных тем, что я дал в моем первом методе, к которому примыкают объяснения Сегнера и Юнга, так же как объяснения Жюрена примыкают ко второму способу, по которому я рассматривал явления этого рода.

Я много распространялся о капиллярных явлениях, так как независимо от интереса, который они представляют сами по себе, их теория проливает яркий свет на взаимные притяжения молекул, составляющих тела, ибо капиллярные явления — это лишь модификация этих притяжений. В самом деле, вычисления показывают нам, что капиллярное действие происходит от притягивающей силы и находится к ней в отношении, значительно меньшем, чем отношение радиуса сферы заметной активности этой силы к радиусу кривизны капиллярной поверхности. Так, если предположить, что это последнее отношение равна 1/10 000, притягивающая сила воды, действующей на саму себя, в 20 000 раз превзошла бы капиллярное действие этой жидкости в стеклянной трубке шириной в 0.001 м, действие, эквивалентное, как это следует из опытов, столбу жидкости в 0.30 м. Эта сила превзошла бы, таким образом, давление

столба воды в 600 м. Такое значительное давление сильно сжимает внутренние слои этой жидкости и увеличивает их плотность, которая из-за этого должна превысить плотность пленки жидкости меньшей толщины, чем сфера заметной активности ее молекул. Не правдоподобно ли предположить, что это тот случай, когда водяная оболочка пузырьков пара делает их немного легче?

Молекулярное притяжение является причиной соединения однородных молекул и твердости тел. Оно — источник сродства разнородных молекул. Подобно тяготению, оно не останавливается на поверхности тел, а проникает в них, действуя за пределами непосредственного контакта, на неощутимых расстояниях. Это с очевидностью доказывают явления капиллярности. Отсюда вытекает зависимость влияния масс на химические свойства или эта способность к насыщению, явления которой Бертолле так удачно исследовал. Так, две кислоты, действуя на одно и то же основание, разделяют его между собой в отношении их химического сродства с ним. Этого не было бы, если бы химическое сродство действовало только через контакт, поскольку тогда наиболее сильная кислота поглотила бы целиком все основание. Фигуры молекул, электричество, теплота, свет и другие причины, сочетаясь с этим основным законом, модифицируют его действия. Опыты г-на Гей-Люссака над явлениями капиллярности смесей воды и спирта, составленных в разных пропорциях, как будто указывают на эти изменения, так как эти явления не следуют в точности законам, вытекающим из соответствующих притяжений двух жидкостей, смешанных вместе, и их удельным весам.

Здесь возникает интересный вопрос, является ли закон молекулярного притяжения, зависящего от расстояния, одинаковым для всех тел? Это кажется вытекающим из общего явления, наблюденного Рихтером и состоящего в том, что отношения оснований, насыщающих кислоту, одинаковы для всех кислот. В таком случае закон капиллярности также должен быть один и тот же для всех жидкостей.

Молекулы твердого тела располагаются так, что их сопротивление изменению состояния максимально. Каждая молекула, если она выведена из этого положения на бесконечно малую величину, стремится к нему вернуться под влиянием увлекающих ее сил. Именно это создает упругость, относительно которой можно предполагать, что все тела ею наделены, если их форму изменяют лишь на бесконечно малую величину. Но когда взаимные расстояния молекул испытывают значительные изменения, эти молекулы находят новое состояние устойчивого равновесия, как это бывает у холоднокованных металлов, особенно у тел, которые вследствие своей мягкости способны сохранять все формы, придаваемые им путем сжатия. Твердость тел и их вязкость кажутся мне не чем иным, как сопротивлением молекул этим изменениям состояния равновесия. Если расширяющая сила тепла противопоставляется притягивающей силе молекул, она все больше и больше уменьшает их вязкость или их взаимное сцепление при своем последовательном возрастании, и когда молекулы тела противопоставляют лишь очень слабое сопротивление их взаимному перемещению внутри и на поверхности тела, это тело становится

жидким. Но его вязкость, хотя и очень ослабленная, существует еще до тех пор, пока увеличение температуры не доведет ее до нуля или неощутимой величины. Тогда каждая молекула, находя в каждом своем положении одинаковые притягивающие силы и одинаковую отталкивающую силу теплоты, уступает самому легкому давлению, и жидкость приобретает идеальную текучесть. Можно с вероятностью предположить, что это имеет место для таких жидкостей, как спирт, которые имеют значительно более высокую температуру, чем их температура замерзания. Именно в этих жидкостях законы капиллярных явлений, как и законы равновесия и движения жидкостей, соблюдаются всего точнее, так как силы, от которых зависят капиллярные явления, так малы, что самого легкого препятствия, такого, как вязкость жидкостей и их трение о заключающие их стенки, достаточно, чтобы заметно изменить их проявление. Влияние формы молекул очень заметно в явлениях замерзания и кристаллизации, протекающих значительно быстрее, если в жидкость погрузить кусок льда или кристалл, образованный из той же жидкости, так как на поверхности этого твердого тела молекулы предстают перед жидкими молекулами, которые соприкасаются с ними, в условиях, наиболее благоприятных для их объединения. Можно понять, что влияние формы молекул при увеличении расстояния должно убывать значительно быстрее, чем само притяжение. Именно так в явлениях, зависящих от фигуры планет, таких, как приливы и отливы моря и предварение равноденствий, это влияние убывает пропорционально кубу расстояния, тогда как притяжение уменьшается только пропорционально квадрату расстояния.

Поэтому представляется, что твердое состояние тел зависит от притяжения молекул, сочетающегося с особенностями их формы. В результате кислота, хотя и притягивает на расстоянии некоторое основание с меньшей силой, чем другое основание, соединяется и кристаллизуется предпочтительно с ним, если по форме ее молекул их контакт с этим основанием теснее. Влияние формы молекул, еще чувствительное в вязких жидкостях, равно нулю в тех, которые обладают идеальной текучестью. Наконец, все наводит на мысль, что в газообразном состоянии не только влияние формы молекул, но и влияние их притягивающих сил нечувствительно по сравнению с отталкивающей силой теплоты. Эти молекулы кажутся тогда только препятствием для распространения этой силы, так как в большом числе случаев, не меняя давления газа, заключенного в данном пространстве, можно заменить многие его части другими газами, равными по объему. Этим объясняется тот факт, что разные газы, приведенные в соприкосновение, с течением времени равномерно смешиваются, так как только тогда они приходят в состояние устойчивого равновесия. Если один из этих газов есть пар, то равновесие устойчиво только в том случае, когда количество этого пара, перемешанного с газом, равно или меньше количества того же пара, который распространился бы при такой же температуре в пустом пространстве, равном тому, которое занимает смесь. Если количество пара превышает эту величину, то для устойчивости равновесия избыток пара должен сконденсироваться в жидкость.

Рассмотрение устойчивости равновесия системы молекул, действующих своими притягивающими силами одна на другую, очень полезно для объяснения многих явлений. Как в системе твердых тел и жидкостей, движимых тяготением, механика дает нам несколько состояний равновесия, химия предлагает нам в сочетаниях одних и тех же элементов различные постоянные состояния. Иногда два элемента соединяются вместе, и молекулы, образованные этим соединением, объединяются с третьими элементами. Таково, по всей видимости, сочетание элементов, составляющих соединение из кислоты с основанием. Иногда элементы одного вещества, не объединяясь вместе, как они бывают соединены в самом веществе, соединяются с другими элементами и образуют с ними тройные или четверные сочетания, так что вещество, выделяемое химическим анализом, является результатом этой реакции. Одни и те же молекулы могут еще соединяться разными сторонами и создавать кристаллы, различные по форме, твердости, удельному весу и своему воздействию на свет. Наконец, условие устойчивого равновесия представляется мне определяющим постоянные отношения, следуя которым различные элементы сочетаются при большом числе обстоятельств, отношения, которые на основании опытов часто представляются самыми простыми числами. Все эти явления зависят от формы простейших молекул, законов их притягивающих сил, отталкивающих сил электричества и теплоты и, может быть, других еще неизвестных сил. Незнание этих сил, в котором мы пребываем, и их исключительная сложность не позволяют подвергать результаты их действия математическому анализу. Но это могучее средство мы заменяем сопоставлением хорошо наблюденных фактов, поднимаясь путем их сравнения к основным отношениям, которые, связывая вместе большое число явлений, служат основанием химических теорий, расширяя их и совершенствуя их практическое применение.

Видя все части материи подверженными действию притягивающих сил, из которых одна бесконечно простирается в пространстве, тогда как другие делаются неощутимыми на самых малых расстояниях, доступных нашим чувствам, можно спросить себя, не являются ли эти последние силы видоизменениями первой силы, модифицированной формами и взаимными расстояниями между молекулами тел? Чтобы принять эту гипотезу, размеры этих молекул надо предположить такими маленькими по отношению к разделяющим их промежуткам, что их плотность будет несравненно больше, чем средняя плотность их совокупности. Сферическая молекула с радиусом, равным 1/1 000 000 м, должна была бы иметь плотность, более чем в 6 000 000 000 раз большую, чем средняя плотность Земли, чтобы на своей поверхности создавать притяжение, равное земному тяготению. А притягивающие силы тел значительно превосходят это притяжение, потому что они отклоняют свет, направление которого не изменяется заметным образом притяжением Земли. Поэтому плотность молекул несравненно превзошла бы плотность тел, если бы их сродство было лишь видоизменением всемирного тяготения. Наконец, ничто не мешает принять этот способ рассмотрения для всех тел: многие явления и среди прочих — легкость, с которой свет проходит во всех направле-

ниях через прозрачные тела, очень тому благоприятствуют. Кроме того, мы имеем поразительный пример почти бесконечной разреженности испарившихся веществ в кометных хвостах, и совсем не абсурдно предположить, что земные тела имеют среднюю плотность, лежащую между абсолютной плотностью и плотностью паров. Тогда сродство зависело бы от формы соединяющихся молекул и их взаимных расположений. Разнообразием этих форм можно было бы объяснить все изменения притягивающих сил и таким путем привести к одному основному закону все явления физики и астрономии. Но невозможность познать фигуры молекул и их взаимные расстояния делает эти объяснения расплывчатыми и бесполезными для развития наук.

# Книга пятая

# КРАТКИЙ ОЧЕРК ИСТОРИИ АСТРОНОМИИ

Многие прейдут, а наука возрастет.

Бэкон.

Мы изложили главные положения системы мира, следуя аналитическому, наиболее простому и прямому порядку. Мы рассмотрели сперва видимые небесные движения, и их сравнение привело нас к производящим их истинным движениям. Чтобы постичь начало, управляющее этими движениями, надо было установить законы движения материи, и мы их подробно изложили. Затем, применяя их к телам солнечной системы, мы увидели, что между этими телами и даже между их мельчайшими молекулами существует притяжение, пропорциональное их массам и обратно пропорциональное квадратам расстояний. Наконец, переходя от этой универсальной силы к ее проявлениям, мы увидели, как из нее рождаются не только все явления, известные астрономам или предвиденные ими, но еще и большое число других, совершенно новых явлений, которые затем были подтверждены наблюдениями.

Но далеко не так просто человеческий разум пришел к этим открытиям. Описанный выше порядок предполагает, что перед глазами имеется совокупность древних и современных наблюдений и что для их сравнения и вывода законов движения небесных тел и причин их неравенств используются все возможности, предоставляемые сегодня математическим анализом и механикой. Но так как эти два направления наших знаний совершенствовались постепенно, вместе с развитием астрономии, их состояние в разные эпохи неизбежно влияло на астрономические теории. Несколько гипотез, пользовавшихся всеобщим признанием, были в полном противоречии с фундаментальными законами механики, которые тогда еще не были известны. И в этом незнании против истинной системы мира, проглядывавшей из всех явлений, было воздвигнуто столько препятствий, что она долгое время не признавалась. Таким образом, ход развития астрономии был затруднен и неуверен, и те истины, которыми она обогащалась, часто были смешаны с заблуждениями, впоследствии преодоленными временем, наблюдениями и прогрессом смежных наук.

Мы даем здесь очерк истории астрономии. Вы увидите, как астрономия оставалась в течение многих веков в состоянии детства, затем вышла из него и выросла во времена Александрийской школы. Потом остановилась в своем развитии до времен усовершенствования ее трудами арабов. Наконец, покинув Африку и Азию, где она зародилась, астрономия утвердилась в Европе, где меньше чем за три века поднялась до высоты, которой достигла в настоящее время. Эта картина прогресса самой величественной из всех естественных наук позволяет простить чело-

вческому уму астрологию, которая с самых древнейших времен везде овладевала слабостью людей, но которую прогресс астрономии навсегда заставил исчезнуть.

## Глава I

## О ДРЕВНЕЙ АСТРОНОМИИ ДО ОСНОВАНИЯ АЛЕКСАНДРИЙСКОЙ ШКОЛЫ

Картина небосвода привлекала внимание первых людей, особенно в тех странах, где ясное небо побуждало их к наблюдению небесных светил. Для земледелия было необходимо различать времена года и знать время их возвращения. Люди не замедлили обнаружить, что восход и заход главных звезд, когда они погружаются в солнечные лучи или выходят из них, могут служить для этой цели. Почти у всех народов такие наблюдения восходят к тем временам, в которых теряется их происхождение.

Но немногие общие сведения о восходе и заходе звезд еще не составляют науку, и астрономия возникла только в эпоху, когда прежние наблюдения были собраны и сравнены между собой, небесные движения были прослежены с большей тщательностью, чем это делалось до тех пор, и были сделаны первые попытки определения законов этих движений. Движение Солнца по орбите, наклоненной к экватору, движение Луны, причина ее фаз и затмений, знакомство с планетами и их обращениями, сферичность Земли и ее измерение могли быть предметом этой древней астрономии. Но то немногое, что осталось нам от ее памятников, недостаточно для определения времени и объема их наблюдений. Мы можем судить о глубокой древности астрономии только по астрономическим периодам, дошедшим до нас, периодам, которые предполагают ряд настолько же продолжительных наблюдений, насколько они были несовершенны. Таковы были превратности дел людских, что то из искусств, которое одно только могло надолго сохранить и передать потомству события протекших веков, — книгопечатание, будучи новейшим изобретением, не оставило нам памяти о первых открывателях, и она полностью утратилась. Великие народы исчезли, не оставив никаких следов своего существования. Большинство наиболее знаменитых городов древности погибли вместе со своими летописями и даже языком, на котором говорили их обитатели. С трудом находим мы место, где был Вавилон. Из стольких памятников искусства и мастерства, украшавших эти города и считавшихся мировыми чудесами, осталось не больше, чем смутное предание и разрозненные обломки, происхождение которых по большей части недостоверно, но величие которых свидетельствует о могуществе народов, воздвигших эти монументы.

Представляется, что практическая астрономия первых времен ограничивалась наблюдением восхода и захода главных звезд, их покрытий Луной и планетами и затмений. Движение Солнца прослеживалось с помощью звезд, которые исчезали в свете зари, и по изменению полуденной тени гномонов. Движение планет определяли по звездам, к которым

они приближались при своих перемещениях. Чтобы узнавать все эти светила и их разнообразные движения, небо было разделено на созвездия, и та небесная зона, названная *Зодиаком*, от которой никогда не отклонялись Солнце, Луна и известные тогда планеты, была разделена на двенадцать следующих созвездий: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы.

Их назвали *знаками,* так как они служили для того, чтобы различать времена года. Так, вступление Солнца в созвездие Овна отмечало во времена Гиппарха начало весны. Это светило проходило потом созвездия Тельца, Близнецов, Рака и т. д. Но попятное движение равноденственных точек изменило, хотя и медленно, соответствие созвездий временам года. Да и в эпоху этого великого астронома оно уже сильно отличалось от того, что было установлено при создании Зодиака. Тем не менее астрономия, совершенствуясь и нуждаясь в знаках для указания движения звезд, продолжала приурочивать, как это делал Гиппарх, начало весны к вступлению Солнца в созвездие Овна. Поэтому тогда начали различать созвездия и знаки Зодиака, которые стали лишь условными символами, служащими для указания движения небесных тел. Теперь, когда стараются все свести к самым простым обозначениям и выражениям, астрономы начинают отказываться от применения знаков Зодиака и отмечают положения светил на эклиптике через их расстояния от точки весеннего равноденствия.

Названия созвездий Зодиака были даны вовсе не случайно. Они выражали отношения, бывшие предметом большого числа изысканий и попыток систематизации. Некоторые из этих названий представляются относящимися к движению Солнца. Например, Рак и Козерог обозначали попятное движение этого светила во время солнцестояний, а Весы символизировали равенство дня и ночи во время равноденствий. Другие названия кажутся относящимися к земледелию и климату народа, у которого Зодиак зародился. Козерог, или созвездие Козы, представляется более уместным поместить в самую высокую точку солнечного пути, чем в самую низкую. В таком его положении, которое возвращает нас на 15 000 лет назад, Весы находились в точке весеннего равноденствия, и созвездия Зодиака поразительно согласовывались с климатом Египта и с его земледелием. Это согласие существовало бы еще и теперь, если бы созвездия Зодиака были названы по их восходу в начале ночи, а не по их восходу вместе с Солнцем в начале дня; например, если бы восход Весов в этот момент указывал на начало весны. В этом случае происхождение пояса Зодиака восходило бы только к 2500 годам до н. э., и эта эпоха гораздо лучше, чем упоминавшаяся выше, соответствовала бы тому немногому, что мы знаем о древности наук, и в частности астрономии.

Из всех народов китайцы в своих летописях приводят наиболее древние наблюдения, пригодные для использования в астрономии. Первые затмения, о которых они упоминают, не могут служить для хронологии из-за неясности изложения. Но эти затмения доказывают, что во времена императора Яо, более 2000 лет до нашей эры, астрономия развивалась в Китае как основа для церемоний. Календарь и оповещение о зат-

мениях были важными предметами, ради которых была организована математическая коллегия. Со времени ее организации наблюдали полуденные тени гномона во время солнцестояний и прохождение звезд через меридиан. Время измеряли с помощью клепсидр — водяных часов, и во время затмений определяли положение Луны относительно звезд, что давало звездные положения Солнца и солнцестояний. Были построены даже инструменты для измерения угловых расстояний между светилами. Объединив все эти методы, китайцы узнали, что солнечный год приблизительно на четверть суток превышает 365 суток. Они установили начало года в день зимнего солнцестояния. Их гражданский год был лунным, и чтобы привести его к солнечному, они использовали период в 19 солнечных лет, соответствующий 235 лунным месяцам, период, в точности равный тому, который через шестнадцать веков Калипп ввел в греческий календарь. Их месяц попеременно был равен 29 и 30 дням, а лунный год содержал 354 дня и, следовательно, был на $11^1/_4$ суток короче их солнечного года. Но в год, когда сумма этих разностей, накопившись, превышала один лунный месяц, они включали еще один месяц. Экватор они разделили на 12 неподвижных знаков и 28 созвездий, в которых они с большой тщательностью определяли положения солнцестояний. Вместо века китайцы употребляли цикл из 60 лет, а вместо недели — цикл из 60 дней, но этот маленький цикл из 7 дней, употреблявшийся на всем востоке, был им известен с самых давних времен. Деление окружности в Китае всегда было подчинено длине года, так что Солнце проходило один градус в сутки. Но подразделения градуса, суток, веса и всех линейных мер были десятичными. И этот пример, данный нам, по меньшей мере, за четыре тысячи лет народом, наиболее многочисленным на Земле, доказывает, что это деление, которое к тому же дает столько преимуществ, может стать исключительно популярным.

Первые наблюдения, полезные для астрономии, были сделаны Чжоу Гуном, память о котором до сих пор почитается в Китае, как об одном из лучших государей, управлявших страной. Брат У Вана, основателя династии Чжоу, он правил империей после его смерти, во время малолетства своего племянника с 1104 по 1098 гг. до нашей эры. Конфуций в Шу цзине — наиболее почитаемой китайцами книге, описывает правителя Чжоу Гуна дающим своему воспитаннику самые мудрые наставления по управлению и морали. Чжоу Гун и его астрономы сделали большое число наблюдений, из которых три, к счастью, дошли до нас и ценны своей глубокой древностью. Два из них — это полуденные длины тени гномона, наблюденные с большой тщательностью во время зимнего и летнего солнцестояния в городе Лояне. Они дают для наклонности эклиптики в ту древнюю эпоху величину, согласную с теорией всемирного тяготения. Третье наблюдение относится к положению точки зимнего солнцестояния на небе в ту же эпоху. Оно также согласуется с теорией в пределах возможностей, даваемых способами, применявшимися тогда для нахождения столь трудно определяемого элемента. Это замечательное согласие не позволяет сомневаться в достоверности этих наблюдений.

Сожжение китайских книг по приказу императора Цинь Шихуанди около 213 г. до н. э. уничтожило следы древних методов вычисления затмений и многих интересных наблюдений. Чтобы найти наблюдения, которые могут быть полезными астрономии, надо приблизиться к нашему времени примерно на четыре века после Чжоу Гуна и перенестись в Халдею [Вавилон]. Птолемей оставил нам несколько таких наблюдений. Наиболее древние из них — это три затмения Луны, наблюденные в Вавилоне в 720 и 719 гг. до н. э. и использованные им для определения движения Луны. Несомненно, Гиппарх и он не имели более древних наблюдений, которые были бы достаточно точны, чтобы служить для этих определений, точность которых зависит от интервала времени, разделяющего крайние наблюдения. Это соображение должно уменьшить наше сожаление о потере халдейских наблюдений, которые Аристотель, если верить Порфиру, цитированному Симплициусом, получил в передаче от Каллисфена и которые относились к эпохе, девятнадцатью веками предшествовавшей царствованию Александра [Македонского, 356—323 гг. до н. э.]. Но халдеи не могли бы открыть иначе, чем длинным рядом наблюдений, период в $6585^1/_3$ суток, в течение которых Луна делает 223 обращения относительно Солнца, 239 аномалистических обращений и 241 обращение относительно своих узлов. Они прибавляли 4/135 окружности, чтобы получить сидерическое движение Солнца в этом интервале, что предполагает сидерический год равным $365^1/_4$ суткам. Птолемей, сообщая об этом периоде, приписывает его определение более древним математикам. Но астроном Геминус, современник Суллы, указывает, что этот период был найден халдеями, и объясняет способ, с помощью которого они вывели суточное движение Луны, и метод, использованный ими для вычисления лунной аномалии. Его свидетельство не составляет сомнений, если учесть, что халдейский сарос — период в 223 лунных месяца, приводящий Луну в ее исходное положение относительно ее узлов, ее перигея и Солнца, составляет часть упоминавшегося периода. Таким образом, затмения, наблюденные в такой период, дают простой способ предсказать те затмения, которые должны произойти в следующие периоды. Этот период и остроумный способ, каким халдеи вычисляли главное лунное неравенство, привели к необходимости проведения большого числа искусно сравненных между собой наблюдений. Они представляют собой наиболее достопримечательный астрономический памятник, созданный до основания Александрийской школы. Вот что достоверно известно об астрономии народа, считавшегося в древности наиболее сведущим в науке о небесных светилах. Взгляды халдеев на систему мира были очень неопределенными, как это и должно было быть в отношении предмета, который не был еще прояснен ни наблюдениями, ни теорией. Впрочем, некоторые из их философов, более счастливые, чем другие, или руководимые более здравыми суждениями о порядке и необъятности вселенной, думали, что кометы, так же как и планеты, движутся, управляемые вечными законами.

Мы имеем очень мало достоверных сведений об астрономии египтян. Точное направление граней их пирамид относительно сторон света гово-

рит о том, что они были искусными наблюдателями. Но никакие наблюдения, сделанные ими, до нас не дошли. Удивительно, что астрономы Александрии были вынуждены обращаться к халдейским наблюдениям — либо потому, что память о египетских наблюдениях к тому времени была потеряна, либо из-за того, что египтяне не хотели поделиться ими из чувства зависти, которое могло быть порождено благосклонностью монархов к школе, этими монархами основанной. В предыдущую эпоху репутация их жрецов привлекла первых философов из Греции. Фалес, Пифагор, Евдокс и Платон позаимствовали у них знания, которыми обогатили свою родину. Вероятно, что школа Пифагора была им обязана некоторыми здравыми идеями, которые она высказывала о строении мира. Макробий определенно приписывает египтянам мысль о движении Меркурия и Венеры вокруг Солнца. Их гражданский год содержал 365 дней, он был разделен на 12 месяцев по 30 дней, и в конце года они прибавляли 5 дополнительных дней — эпагоменов. Но, по проницательному замечанию г-на Фурье, наблюдение предсолнечных восходов самой яркой звезды — Сириуса — показало им, что возвращение восхода этой звезды каждый год запаздывало на четверть суток. На основании этого они ввели сотический период в 1461 год, который приводил приблизительно к одним и тем же временам года их месяцы и праздники. Этот период возобновился в 139 г. н. э. Если, как все на это указывает, ему предшествовал подобный же период, начало этого более раннего периода восходило к эпохе, в которую, как с вероятностью можно предположить, египтяне дали названия созвездиям Зодиака и основали свою астрономию. Они заметили, что за 25 их лет было 309 возвращений Луны к Солнцу, что дает очень точное значение длины месяца. Наконец, из того, что нам осталось от их Зодиаков, видно, что они тщательно наблюдали положение солнцестояний в зодиакальных созвездиях. Как сообщает Дион Кассий, неделей мы обязаны египтянам. Этот период основан на самой старой астрономической системе, помещавшей Солнце, Луну и планеты в таком порядке по расстояниям от Земли, начиная с самого большого: Сатурн, Юпитер, Марс, Солнце, Венера, Меркурий, Луна. Последовательные части ряда дней, деленных на 24 части каждый, были посвящены в том же порядке этим светилам. Каждый день получал название от светила, соответствовавшего его первой части. Неделю мы находим и в Индии, у браминов, с нашими названиями; и я убедился в том, что дни, одинаково названные ими и нами, соответствуют одним и тем же физическим моментам. Этот период, бывший в употреблении у арабов, у евреев, у ассирийцев и на всем Востоке, возобновлялся беспрерывно и неизменно, проходя через смену веков и государств. Среди стольких различных народов невозможно узнать, кто его придумал. Мы только можем утверждать, что недельный период является самым древним памятником астрономических знаний. Так как египетский гражданский год заключал в себе 365 дней, легко видеть, что, если давать каждому году название его первого дня, названия этих лет всегда будут названиями дней недели. Так должны были сформироваться семилетние периоды, которые мы видим в употреблении у евреев, но которые, несо-

мненно, принадлежали народу, у которого год измерялся по Солнцу и имел 365 дней.

Астрономические знания, по-видимому, были основанием всех теогоний, происхождение которых объясняется, таким образом, весьма просто. В Халдее и в Древнем Египте астрономия культивировалась только в храмах жрецами, основавшими на ней суеверия, хранителями которых они были. Сказочные истории о героях и богах, которые они распространяли среди легковерных невежд, были лишь аллегорическим изложением небесных явлений и действий сил природы, аллегориями, которые, благодаря всемогуществу подражания — одной из главных пружин нравственного мира, до сих пор сохранились в религиозных учреждениях. Пользуясь для установления своего владычества естественным желанием проникнуть в будущее, жрецы создали астрологию. Человек, обманутый своими чувствами и считающий себя центром вселенной, легко убедил себя, что небесные светила влияют на его судьбу и что возможно ее предвидеть, наблюдая расположение светил в момент его рождения. Эта ошибка, дорогая его самолюбию и необходимая его тревожному любопытству, так же стара, как и астрономия. Она продержалась до конца позапрошлого века, до эпохи, в которую знание истинной системы мира, получившее всеобщее распространение, безвозвратно ее уничтожило.

Начала астрономии в Персии и в Индии теряются, как и у всех народов, во мраке первых дней их истории. Индийские таблицы дают основание предполагать, что астрономия у индийцев была довольно развитой, но все говорит о том, что эти таблицы не очень древние. Здесь я отклоняюсь с сожалением от взглядов моего знаменитого и несчастного друга, смерть которого, вечная причина сожалений, является ужасным доказательством непостоянства народного расположения. Прославив свою жизнь работами, полезными для науки и для человечества, своей добродетелью, мужеством и благородством характера, он погиб, пав жертвой самой кровавой тирании, противопоставляя спокойствие и достоинство праведника неистовствам народа, кумиром которого он некогда был. Индийские таблицы имеют две главные эпохи, восходящие: одна — к 3102 г. до н. э., а другая — к 1491 г. Эти эпохи связаны движениями Солнца, Луны и планет таким образом, что, исходя из положений, которые индийские таблицы дают для всех этих светил во вторую эпоху, и восходя с помощью этих таблиц к первой эпохе, мы находим общее соединение светил, предполагавшееся ими в эту первую эпоху. Ученый, о котором я сейчас говорил, знаменитый Байи, в своей работе «Трактат об индийской астрономии» стремился доказать, что эта первая эпоха была основана на наблюдениях. Несмотря на его доказательства, изложенные с той ясностью, которую он умел внести в самые отвлеченные проблемы, я считаю очень вероятным, что она была придумана, чтобы дать в Зодиаке общее начало движениям небесных тел. Наши последние астрономические таблицы, значительно улучшенные сравнением теории с большим числом очень точных наблюдений, не позволяют получить соединений, предполагаемых индийскими таблицами. Наши таблицы в этом отношении дают значительно большие разности, чем их собствен-

ные погрешности. Правда, некоторые элементы индийской астрономии могли иметь величины, которые им приписывали лишь задолго до нашей эры. Например, надо вернуться на 6000 лет назад, чтобы получить их уравнение центра Солнца. Но независимо от погрешностей их определений, видно, что они рассматривали неравенства Солнца и Луны только по отношению к затмениям, в которых годичное уравнение Луны прибавляется к уравнению центра Солнца и увеличивает его на величину, близкую к разности его истинного значения и значения, получаемого из индийских таблиц. Многие элементы, такие как уравнения центров Юпитера и Марса, в индийских таблицах очень отличаются от тех, которые должны были быть в их первую эпоху. Совокупность этих таблиц и в особенности невозможность общего соединения, которое они предполагают, показывает, что они были составлены или, по крайней мере, исправлены в новейшие времена. Это же вытекает из средних движений, приписываемых ими Луне по отношению к ее перигею, ее узлам и к Солнцу. Они быстрее, чем у Птолемея, и это указывает, что они были составлены после этого астронома, так как из теории всемирного тяготения известно, что эти три движения ускоряются уже многие века. Таким образом, этот вывод теории, столь важный для лунной астрономии, служит еще для уточнения хронологии. Между тем репутация древних индийцев не позволяет сомневаться в том, что они во все времена занимались астрономией. Греки и арабы, начав заниматься науками, почерпнули у индийцев ее первые элементы. Из Индии к нам пришел остроумный метод обозначения всех чисел десятью знаками, давая им одновременно и абсолютное значение, и значение, зависящее от положения, — идея тонкая и важная, которая теперь кажется нам такой простой, что мы едва чувствуем ее достоинства. Но именно эта простота и исключительная легкость, вытекающая из нее при всех вычислениях, ставят нашу арифметическую систему в первый ряд полезных изобретений, и можно оценить трудность этого достижения, если учесть, что этот метод ускользнул от гения Архимеда и Аполлония, двух величайших людей, которыми гордится античность.

Греки начали заниматься астрономией много позже, чем египтяне и халдеи, учениками которых они были. Из сказаний, заполняющих первые века их истории, трудно выделить их астрономические знания. Их многочисленные школы, предшествовавшие Александрийской, дают очень мало наблюдений. Греки трактовали астрономию как науку полностью умозрительную и предавались вольным домыслам. Очень странно, что при наличии такого множества систем, соперничавших между собой и ничему не учивших, очень простая мысль о том, что единственный способ познать природу состоит в ее изучении путем опыта, ускользнула от стольких философов, многие из которых были одарены редкой гениальностью. Впрочем, это не так удивительно, если принять во внимание, что первые наблюдения представляли только изолированные факты, непривлекательные для нетерпеливого воображения, ищущего их причину, и следовали одни за другими с чрезвычайной медлительностью. Понадобился длинный ряд веков, накопивших большое число наблюде-

ний, чтобы между явлениями обнаружить связи, которые, распространяясь все шире, присоединяют к интересу познания истины интерес к общим умозрениям, к которым человеческий ум непрерывно стремится подняться.

Однако среди философских мечтаний греков мы видим, как в астрономии пробиваются здравые идеи, собранные ими в путешествиях и усовершенствованные ими. Фалес, родившийся в Милете в 640 г. до н. э., поехал учиться в Египет. Вернувшись в Грецию, он основал Ионийскую школу, в которой учил сферичности Земли, наклонности эклиптики и истинным причинам затмений Солнца и Луны. Говорят, что он даже постиг, как их предсказывать, несомненно, применяя методы или периоды, сообщенные ему египетскими жрецами.

Преемниками Фалеса были Анаксимандр, Анаксимен и Анаксагор. Двое первых ввели в употребление в Греции гномон и географические карты. Анаксагор подвергался преследованиям афинянами за обучение истинам ионийской школы. Его упрекали в том, что он лишает богов влияния на природу, пытаясь подчинить явления неизменным законам. Осужденный вместе со своими детьми, он был обязан жизнью только заступничеству Перикла, своего ученика и друга, сумевшего заменить ему смертную казнь ссылкой. Так, истина, чтобы утвердиться на Земле, часто должна была бороться с принятыми заблуждениями, что не раз оказывалось гибельным для тех, кто ее распространял.

Из Ионической школы вышел глава другой, гораздо более знаменитой школы. Пифагор, родившийся около 590 г. до н. э., был сперва учеником Фалеса, который посоветовал ему поехать в Египет, где Пифагор принял посвящение в таинства жрецов, чтобы познать глубины их учения. Затем он отправился на берега Ганга, где ознакомился с браминами. После возвращения на родину царящий там деспотизм заставил его уехать в изгнание, и он поселился в Италии, где основал свою школу. Все астрономические знания Ионийской школы преподавались в школе Пифагора с большими подробностями. Но что ее принципиально отличало — это знание двух движений Земли: вокруг себя самой и вокруг Солнца. Чтобы скрыть это знание от власть имущих, Пифагор завуалировал его. Но позднее оно было ясно изложено его учеником Филолаем.

По представлениям пифагорейцев, кометы, подобно планетам, движутся вокруг Солнца; это не проходящие метеоры, образовавшиеся в нашей атмосфере, но вечные создания природы. Эти совершенно верные сведения о системе мира были подхвачены и представлены Сенекой с энтузиазмом, какой великая идея об одном из наиболее обширных предметов человеческих знаний должна была возбуждать в душе философа. «Мы не будем удивляться, — сказал он, — что еще не узнали закона движения комет, зрелища которых столь редки, и что мы не знаем ни начала, ни конца обращения этих светил, которые приходят к нам с огромных расстояний. Не прошло еще и пятнадцати столетий, как Греция сосчитала звезды и дала им имена... Но придет день, когда после многовекового изучения вещи, скрытые от нас в настоящее время,

сделаются очевидными, и наши потомки будут удивляться, что такие ясные истины от нас ускользнули».

В этой же школе существовало мнение, что планеты обитаемы и что звезды являются солнцами, рассеянными в пространстве, и центрами стольких же планетных систем. Эти философские взгляды по их величию и правильности должны были вызвать одобрение древних. Но так как они сопровождались такими представлениями о порядке, как гармония небесных сфер, и не были в то время подтверждены доказательствами, которые они получили лишь после, по своему согласию с наблюдениями — не удивительно, что их истинность, противоречащая иллюзиям, не была признана.

Единственное наблюдение греков до Александрийской школы, сохраненное нам историей астрономии, — это наблюдение летнего солнцестояния в 432 г. до н. э., сделанное Метоном и Эвктемоном. Первый из этих астрономов прославился 19-летним циклом, соответствующим 235 лунным месяцам, который он ввел в календарь. Самый простой способ измерения времени состоит в использовании одних лишь солнечных обращений. Но в младенческие годы человечества фазы Луны предоставляли людскому неведению такое естественное деление времени, что оно было принято повсеместно. Праздники и игры устанавливались по возвращению лунных фаз, а когда надобности земледелия заставили народы прибегнуть к Солнцу, чтобы различать времена года, они все же не отказались от употребления старинного способа измерения времени по обращениям Луны, возраст которой можно было знать по дням месяца. Они старались установить между обращениями этого светила и Солнца соответствие, основанное на периодах, заключавших целое число этих обращений. Самый простой из них — 19-летний период. Метон установил поэтому цикл из 19 лунных лет, из которых 12 были обыкновенными, по 12 месяцев, а 7 остальных — по 13. Эти месяцы были неодинаковы и распределялись так, что на 235 месяцев цикла 110 имели по 29 дней, а 125 — по 30 дней. Этот порядок, предложенный Метоном Греции, собравшейся на Олимпийские игры, был встречен аплодисментами и единогласно принят. Но вскоре обнаружилось, что в конце периода новый календарь отстает приблизительно на четверть суток от новолуния. Калипп предложил учетверить 19-летний цикл и образовать период в 76 лет, в конце которого исключался бы один день. Этот период был назван *калиппическим* по имени его автора. Хотя и менее древний, чем халдейский сарос, он уступает ему в точности.

Во времена Александра Пифей прославил Марсель, свою родину, как географ и астроном. Ему мы обязаны наблюдениями полуденной тени гномона в этом городе во время летнего солнцестояния. Это самое древнее наблюдение такого рода после наблюдения Чжоу Гуна. Оно драгоценно тем, что подтверждает постепенное уменьшение наклонности эклиптики. Приходится пожалеть, что древние астрономы недостаточно часто применяли гномон, который дает значительно большую точность, чем их армиллярные сферы. Приняв некоторые, легко выпол-

пимые меры предосторожности, чтобы отнивелировать поверхность, на которую проектируется тень, они могли бы оставить нам наблюдения склонений Солнца и Луны, которые были бы теперь очень полезны.

## Глава II

## ОБ АСТРОНОМИИ С ОСНОВАНИЯ АЛЕКСАНДРИЙСКОЙ ШКОЛЫ ДО АРАБОВ

До основания Александрийской школы практическая астрономия разных народов не оставила ничего, кроме наблюдений, относящихся к явлениям смены времен года и затмениям, предметам их забот или страхов. Некоторые периоды, основанные на очень длинных интервалах времени, а также счастливые догадки о строении вселенной, смешанные со многими заблуждениями, составляли всю их теоретическую астрономию.

В Александрийской школе мы впервые видим связную систему наблюдений, сделанных с инструментами для измерения углов и обработанных путем тригонометрических вычислений. Астрономия приняла тогда новую форму, которая в следующие века была лишь усовершенствована. Положения звезд были определены с большей точностью, чем это делалось раньше, лучше были определены неравенства движения Солнца и Луны. С большой тщательностью следили за движениями планет. Наконец, Александрийская школа породила первую астрономическую систему, охватывающую совокупность небесных явлений, систему, по правде говоря, худшую, чем система школы Пифагора, но так как она была основана на сравнении наблюдений, самим этим сравнением она давала возможность ее исправлять и приближать к истинной системе природы, тогда как первоначально она была лишь несовершенным наброском этой системы.

После смерти Александра его главные полководцы разделили его империю, и Птолемей Сотер получил Египет как свою долю. Его любовь к наукам и его благодеяния привлекли в Александрию, столицу этого государства, большое число ученых из Греции. Наследник его трона и интересов, его сын Птолемей Филадельф удержал этих ученых особым покровительством. Он поселил их в обширном здании, включавшем обсерваторию и знаменитую библиотеку, составленную с большими стараниями и затратами Деметрием из Фалерона. Таким образом, имея инструменты и необходимые им книги, они, не отвлекаясь, могли посвятить себя работам, которые поощрялись еще правителем, часто приходившим для беседы с ними. Развитие наук под влиянием этой школы и великие люди, воспитанные ею или ее современниками, делают эпоху Птолемеев одной из самых памятных в истории человеческого разума.

Аристилл и Тимохарис были первыми наблюдателями Александрийской школы. Они работали около 300 г. до н. э. Их наблюдения положений главных звезд Зодиака позволили Гиппарху открыть прецессию

равноденствий и послужили основанием теории, которую Птолемей дал для этого явления.

После них первым астрономом этой школы был Аристарх из Самоса. Объектом его изысканий были, по-видимому, наиболее сложные элементы астрономии. К несчастью, его работы до нас не дошли. Единственная сохранившаяся из них — это трактат «О размерах Солнца и Луны и расстояниях до них», где изложен остроумный способ, которым он пытался определить отношение этих расстояний. Аристарх измерял угол, заключенный между двумя светилами, в момент, когда, как он считал, освещена точно половина лунного диска. В этот момент луч зрения, проведенный от глаза наблюдателя к центру Луны, перпендикулярен линии, соединяющей центры Луны и Солнца.

Найдя, что угол при наблюдателе меньше, чем прямой, на 1/30 этого угла, он заключил, что Солнце в 19 раз дальше от нас, чем Луна. Этот результат, несмотря на его неточность, отодвигал границы вселенной далеко за те пределы, которые приписывались ей в те времена. В своем трактате Аристарх предполагает, что видимые диаметры Солнца и Луны равны между собой и составляют 1/180 часть окружности. Эта величина — слишком большая. Но потом он исправил эту ошибку; так, у Архимеда мы находим, что Аристарх считал диаметр Солнца равным 1/720 части Зодиака, что равно среднему из значений, которые сам Архимед, немного лет спустя, приписал этому диаметру посредством очень остроумного метода. Поправка эта не была известна Паппу, знаменитому Александрийскому геометру, жившему в IV в. и комментировавшему трактат Аристарха. Это позволяет подозревать, что пожар значительной части Александрийской библиотеки во время осады этого города, выдержанной Цезарем, уже уничтожил большую часть рукописей Аристарха, так же как и множество других, столь же ценных работ.

Аристарх воскресил мнение пифагорейской школы о движениях Земли. Но нам не известно, насколько он продвинул таким способом объяснение небесных явлений. Мы знаем только, что этот здравомыслящий астроном, понимая, что движение Земли не влияет заметным образом на видимые положения звезд, удалил их от нас несравненно дальше Солнца, так что, по-видимому, он лучше всех в древности представлял себе величину вселенной. Его взгляды были нам переданы Архимедом в его «Псаммите». Этот великий геометр открыл способ выражать все числа, полагая, что они образованы из последовательных периодов мириадов мириад. Единицы первого были простыми единицами, единицы второго были мириадами мириад и т. д. Он обозначал части каждого периода теми же знаками, которые греки употребляли в своем исчислении до 100 000 000. Чтобы сделать ощутимее преимущества своего метода, Архимед предложил выразить число песчинок, которое может заключать небесная сфера; причем он еще увеличил трудность задачи, выбрав гипотезу, которая дает этой сфере самые большие размеры. С этой целью он и излагает мнение Аристарха.

Измерение Земли, приписываемое Эратосфену, является первой попыткой такого рода, известной нам из истории астрономии. Очень веро-

ятно, что много раньше уже пытались измерить Землю. Но от этих попыток не осталось ничего, кроме нескольких оценок земной окружности; впоследствии путем скорее хитроумных, чем надежных приближений, их старались привести к одной величине, близкой к получаемой из современных измерений. Эратосфен, заметив, что в Сиене [ныне Ассуан] в Египте во время летнего солнцестояния Солнце освещает колодец на всю его глубину и сравнив это наблюдение с меридианной высотой Солнца в Александрии во время того же солнцестояния, нашел, что дуга небосвода, заключенная между зенитами этих двух городов, равна 1/50 доле окружности. А так как расстояние между ними было оценено приблизительно в 5000 стадиев, он приписал всему земному меридиану длину в 252 000 стадиев. Маловероятно, что для такого важного изыскания этот астроном удовлетворился грубым наблюдением освещенного Солнцем колодца. Это соображение и рассказ Клеомеда позволяют думать, что он наблюдал полуденные тени гномона во время солнцестояния в Сиене и в Александрии. По этой причине небесная дуга, определенная им между зенитами двух городов, мало отличается от результатов современных наблюдений. Поместив Сиену и Александрию на одном и том же меридиане, Эратосфен ошибся. Есть основание полагать, что он ошибся еще раз, оценив всего в 5000 стадиев расстояние между этими городами, если стадий, которым он пользовался, содержал 300 локтей элефантинского нилометра. В этом случае две ошибки Эратосфена почти точно скомпенсировались. Это приводит к мысли, что Эратосфен только воспроизвел более древнее, тщательное измерение Земли, истоки которого были утеряны.

Эратосфен измерил наклонность эклиптики и нашел расстояние между тропиками равным 11 частям окружности, разделенной на 83 части. Гиппарх и Птолемей не внесли никаких изменений в эту величину. Примечательно, что если вместе с александрийскими астрономами предположить, что широта Александрии равна 31 шестидесятеричному градусу, эта мера наклонности эклиптики помещает Сиену точно под тропиком, в полном согласии с мнением древних.

Из всех древних астрономов Гиппарх из Никеи в Вифинии, живший во II в. до н. э., большим числом и точностью своих наблюдений, важными выводами, которые он сумел сделать из их сравнения между собой и с ранее сделанными наблюдениями, и остроумными методами, которыми он руководствовался в своих изысканиях, больше всего заслужил признательность астрономии. Птолемей, которому главным образом мы обязаны знакомством с его работами, постоянно опирался на его наблюдения и теории. Он справедливо ценил Гиппарха как астронома большой изобретательности, редкой прозорливости и искреннего друга истины. Неудовлетворенный тем, что было сделано до него, Гиппарх хотел все начать сначала и принимать только результаты, основанные на новом анализе наблюдений или на новых, более точных, чем у его предшественников, наблюдениях. Ничто не дает лучшего представления о ненадежности египетских и халдейских наблюдений Солнца и звезд, чем то, что он оказался вынужденным употребить первые на-

блюдения астрономов Александрии, чтобы построить свои теории Солнца и прецессии равноденствий. Он определил продолжительность тропического года, сравнивая одно из своих наблюдений летнего солнцестояния с таким же солнцестоянием, наблюденным Аристархом в 281 г. до н. э. Полученная продолжительность показалась ему несколько меньшей, чем год в $365^1/_4$ суток, употреблявшийся до того времени, и он пришел к выводу, что в конце трех веков следовало исключать одни сутки. Но он сам заметил малую точность определения, основанного на наблюдениях солнцестояний, и преимущество использования для этой цели наблюдений равноденствий. Наблюдения, проводившиеся им в течение 33 лет, привели его почти к тому же выводу. Гиппарх обнаружил еще, что промежутки между двумя соседними равноденствиями не равны между собой и что они неодинаково разделяются солнцестояниями. Таким образом, проходило $94^1/_2$ суток от весеннего равноденствия до летнего солнцестояния и лишь $92^1/_2$ суток — между летним солнцестоянием и осенним равноденствием.

Чтобы объяснить эти различия, Гиппарх предположил, что Солнце движется равномерно по круговой орбите, но вместо того, чтобы поместить Землю в ее центре, отдалил ее от этого центра на 1/24 часть радиуса и установил апогей в 6° Близнецов. С такими исходными данными он составил первые таблицы Солнца, упоминаемые в истории астрономии. Принятое в них уравнение центра слишком велико. С большой вероятностью можно предположить, что сравнение затмений, в которых это уравнение представляется увеличенным на годичное уравнение Луны, утвердило Гиппарха в его ошибке и, может быть, даже вызвало ее, потому что эта ошибка, превосходящая 1/6 часть полной величины уравнения, уменьшилась до 1/16 этой величины в вычислениях этих явлений. Он еще ошибался, предполагая эллиптическую орбиту Солнца круговой и считая равномерной скорость его движения. В наши дни, измерив его видимый диаметр, мы убедились в противном. Но во времена Гиппарха такие наблюдения были невозможны, и его таблицы Солнца, несмотря на их несовершенство, являются долговременным памятником его гению, настолько уважаемым Птолемеем, что он подчинял ему свои наблюдения.

Гиппарх, этот великий астроном, рассматривал также движения Луны. Путем сравнения затмений, выбранных в наиболее благоприятных обстоятельствах, он определил времена ее обращений относительно звезд, Солнца, ее узлов и ее апогея. Он нашел, что промежуток в $126\,007^1/_{24}$ суток заключает 4267 полных месяцев, 4573 возвращения аномалий, 4612 звездных обращений Луны за вычетом 15/720 долей окружности. Кроме того, он определил, что за 5458 месяцев Луна 5923 раза возвращалась к одному и тому же узлу своей орбиты. Эти результаты, плоды огромной работы над очень большим числом наблюдений, из которых до нас дошла только небольшая часть, являются, может быть, самым драгоценным памятником древней астрономии как по своей точности, так и потому, что для этой эпохи они дают нам непрерывно изменяющуюся продолжительность лунных обращений. Гип-

парх определил еще эксцентриситет лунной орбиты и ее наклонность к эклиптике и нашел почти такие же значения, какие бывают теперь в затмениях, где, как известно, и тот и другой из этих элементов уменьшены эвекцией и главным неравенством Луны по широте. Постоянство наклона лунной орбиты к плоскости эклиптики, несмотря на изменения положения, которые эта плоскость испытывает по отношению к звездам и которые, по древним наблюдениям, заметны в ее наклонности к экватору, является результатом действия всемирного тяготения, что подтверждается наблюдениями Гиппарха.* Наконец, он определил параллакс Луны, используя который попробовал вывести параллакс Солнца по ширине теневого конуса Земли в том месте, где Луна проходит через него во время затмений, что привело его к величине этого параллакса, найденной Аристархом.

Гиппарх сделал очень много наблюдений планет. Но будучи слишком большим другом истины, чтобы строить сомнительные гипотезы относительно их движений, он предоставил заботу о создании их теории своим последователям.

Новая звезда, появившаяся в его время, побудила Гиппарха предпринять составление звездного каталога, чтобы дать потомкам возможность распознавать изменения, которые могла испытать картина звездного неба. Кроме того, он понимал важность этого каталога для наблюдений Луны и планет. Он использовал метод, уже употреблявшийся Аристиллом и Тимохарисом. Плодом этой продолжительной и трудной работы было важное открытие прецессии равноденствий. Сравнивая свои наблюдения с наблюдениями этих астрономов, Гиппарх обнаружил, что звезды изменили свои положения относительно экватора, но сохранили ту же широту над эклиптикой. Сперва он заподозрил, что это касалось только звезд, расположенных в Зодиаке, но, заметив, что они все сохраняют свое взаимное расположение, он пришел к заключению, что это общее явление. Чтобы его объяснить, он предположил у небесной сферы прямое движение вокруг полюсов эклиптики, откуда возникало понятное движение равноденствий по долготе относительно звезд. Это движение показалось ему равным 1/360 части Зодиака в столетие. Но он представил свое открытие с осторожностью, которую ему должна была внушить малая точность наблюдений Аристилла и Тимохариса.

* Кеплер отметил это постоянство в конце своего «Конспекта коперниковой астрономии». Но он основал его на очень странном рассуждении: «Подобает, чтобы Луна, второстепенная планета и спутник Земли, имела постоянную наклонность к земной орбите, каковы бы ни были изменения, которые эта плоскость испытывает в своем положении относительно звезд. И если древние наблюдения наибольших широт Луны и наклонности эклиптики противоречат этой гипотезе, то скорее, чем отбросить эту гипотезу, надо было подвергнуть эти данные сомнению». Здесь поиски соответствия и гармонии привели Кеплера к правильному результату. Но сколько раз они вводили его в заблуждение? Однако отдаваясь своему воображению и склонности к домыслам, можно встретить истину благодаря счастливому случаю. При невозможности распознать ее среди заблуждений, которыми она почти всегда сопровождается, вся заслуга ее открытия достается тому, кто прочно ее устанавливает путем наблюдения и вычисления — единственных основ человеческих знаний.

География должна быть признательна Гиппарху за метод определения положения точек на Земле их широтой и долготой, для чего он первый употреблял затмения Луны.

Многочисленные вычисления, требовавшиеся для всех этих изысканий, заставили его изобрести или, по крайней мере, усовершенствовать сферическую тригонометрию. К несчастью, все работы, сделанные им в этой области, погибли. Мы знаем о них только из «Альмагеста» Птолемея, передавшего нам главные элементы теорий этого великого астронома и некоторые его наблюдения. Сравнение их с современными наблюдениями позволило оценить их точность, а полезность, которую они до сих пор имеют для астрономии, заставляет жалеть об исчезновении других его наблюдений, особенно наблюдений планет; таких древних наблюдений дошло до нас очень мало. Единственная работа Гиппарха, дошедшая до нас, — это критические заметки о сфере Евдокса, описанной в поэме Аратоса; эта работа была написана до открытия прецессии равноденствий. Положения звезд на этой сфере настолько ошибочны и для своей эпохи дают такие противоречивые результаты, что нельзя без удивления видеть, как Ньютон основывает на их грубых положениях хронологическую систему, значительно отклоняющуюся от дат, которые с большой вероятностью приписываются многим событиям древности.

Промежуток около трех веков, отделяющий Гиппарха от Птолемея, дал нам Геминуса, трактат по астрономии которого дошел до нас, и нескольких наблюдателей, таких как Агриппа, Менелай и Феон из Смирны. Отметим еще состоявшуюся в эту эпоху реформу римского календаря, для которой Юлий Цезарь призвал из Александрии астронома Созигена. К этому же времени, по-видимому, относятся точные сведения о приливах и отливах моря. Посидоний открыл законы этого явления, которое, по своей очевидной связи с движениями Солнца и Луны, относится к астрономии и которому натуралист Плиний дал замечательное по своей точности описание.

Птолемей, родившийся в Птолемаиде в Египте, жил в Александрии около 130 г. н. э. Гиппарх своими многочисленными работами открыл новую грань астрономии. Но он оставил своим последователям заботу об уточнении своих теорий новыми наблюдениями и о создании тех теорий, которых еще недоставало. Птолемей, следуя заветам Гиппарха, в своем большом труде, названном «Альмагестом», постарался дать полную систему астрономии.

Его наиболее важное открытие — это эвекция Луны. До Гиппарха движение Луны рассматривалось только по отношению к затмениям, в которых достаточно было учитывать лишь ее уравнение центра, особенно, если полагать, как делал этот астроном, уравнение центра Солнца большим, чем истинное, что частично заменяло годичное уравнение Луны. По-видимому, Гиппарх понял, что это не представляет движение Луны в ее квадратурах и что наблюдения давали в этом отношении большие аномалии. Птолемей тщательно проследил эти аномалии, определил их закон и с большой тщательностью установил их величину. Чтобы их представить, он мысленно заставил Луну двигаться по эпициклу, носи-

мому эксцентриком, центр которого вращался вокруг Земли в направлении, обратном движению эпицикла.

В древности существовало общее мнение, что у небесных светил должно быть круговое и равномерное движение, как самое совершенное. Это заблуждение сохранялось до Кеплера, которого оно надолго задержало в его исследованиях. Птолемей также разделял его и, поместив Землю в центр небесных движений, пытался при таком предположении представить их неравенства. Вообразим себе первую окружность, в центре которой находится Земля. По этой окружности движется центр второй окружности, по которой движется центр третьей окружности, и т. д. до последней окружности, по которой равномерно движется светило. Если радиус одной из этих окружностей превосходит сумму других радиусов, видимое движение светила вокруг Земли будет представлено средним равномерным движением и несколькими неравенствами, зависящими от отношения между радиусами разных окружностей и от движения их центров и светила. Поэтому, увеличивая число и подходящим образом подбирая эти величины, можно представить все неравенства видимого движения. Таково самое общее представление о гипотезе эпициклов и эксцентриков [деферентов], так как эксцентрик можно рассматривать как окружность, центр которой движется вокруг Земли с большей или меньшей скоростью, обращающейся в ноль, если этот центр неподвижен. Геометры, жившие до Птолемея, занимались видимыми движениями планет, исходя из этой гипотезы; по «Альмагесту» также видно, что великий геометр Аполлоний уже разрешил проблему остановок и попятных движений планет.

Птолемей предполагал, что Солнце, Луна и планеты движутся вокруг Земли в следующем порядке по расстояниям: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. Каждая из планет, расположенных выше Солнца, двигалась по эпициклу, центр которого описывал вокруг Земли эксцентрик [деферент] за время, равное времени обращения планеты. Период движения светила по эпициклу был равен периоду обращения Солнца, и, достигнув самой близкой к Земле точки эпицикла, оно всегда оказывалось в противостоянии с Солнцем. Ничто не определяло в этой системе абсолютные размеры окружностей и эпициклов. Птолемею нужно было знать лишь отношение радиуса каждого эпицикла к радиусу окружности, описанной его центром. Мысленно он заставлял подобным же образом двигаться каждую из нижних планет по эпициклу, центр которого описывал эксцентрик вокруг Земли. Но движение этой точки было равно солнечному движению, и планета пробегала свой эпицикл за время, которое в современной астрономии равно периоду ее обращения вокруг Солнца. Планета всегда оказывалась в соединении с ним, когда она достигала самой низкой точки своего эпицикла. И здесь ничто не определяло абсолютную величину окружностей и эпициклов. Предшествовавшие Птолемею астрономы различным образом определяли места Меркурия и Венеры в планетной системе. Более древние из них, мнение которых разделял и Птолемей, помещали их под Солнцем, другие — над ним. Наконец, некоторые египтяне считали их

движущимися вокруг Солнца. Странно, что Птолемей не упомянул об этом предположении, сводившемся к приравниванию эксцентриков этих двух планет к солнечной орбите. Если бы, кроме того, он предположил, что эпициклы верхних планет равны и параллельны этой орбите, его система свелась бы к тому, что, подобно представлениям Тихо Браге, все планеты двигаются вокруг Солнца, в то время как это светило обращается вокруг Земли. И тогда осталось бы сделать лишь один шаг, чтобы прийти к истинной системе мира. Такой способ определения произвольных в системе Птолемея, когда окружности и эпициклы, описанные годичным движением, предполагаются равными солнечной орбите, делает очевидным соответствие этого движения движению Солнца. Изменяя таким образом эту систему, он дает средние расстояния планет от светила в долях его расстояния от Земли, так как эти расстояния являются отношениями радиусов эксцентриков к радиусам эпициклов для верхних планет и радиусов эпициклов к радиусам эксцентриков для двух нижних. Такое простое и естественное изменение системы Птолемея ускользнуло от всех астрономов до Коперника. Никто из них не был достаточно поражен соотношениями геоцентрического движения планет с движениями Солнца, чтобы отыскать их причину. Никто не полюбопытствовал узнать их расстояния от Солнца и от Земли. Все удовольствовались уточнением, новыми наблюдениями элементов, определенных Птолемеем, ничего не меняя в его гипотезах.

Если с помощью эпициклов можно удовлетворить неравенствам видимого движения светил, то невозможно одновременно представить изменения их расстояний. Птолемей мог знать эти изменения, относящиеся к планетам, только очень неточно, так как тогда не было возможности измерять их видимые диаметры. Но наблюдений Луны было достаточно, чтобы показать ему ошибочность этих гипотез, по которым перигейный диаметр Луны в квадратурах был бы почти вдвое больше ее апогейного диаметра в сизигиях. К тому же каждое новое неравенство, открываемое совершенствующимся искусством наблюдения, перегружало его систему новым эпициклом. Таким образом, отнюдь не подтверждаясь дальнейшими успехами астрономии, она только все больше усложнялась, и это одно должно убедить нас в том, что эта система не соответствует природе. Но если рассматривать ее как способ изображать небесные движения и подвергать их вычислениям, то такая первая попытка, приложенная к весьма обширной проблеме, делает честь мудрости ее автора. Такова слабость человеческого ума, что он часто нуждается в помощи гипотез, чтобы связать явления между собой и определить их законы. Ограничивая гипотезы таким применением, избегая приписывать им реальность и непрерывно исправляя их посредством новых наблюдений, мы можем прийти, наконец, к истинным причинам или, по крайней мере, дополнить гипотезы и выделить из наблюденных явлений те, которые при данных обстоятельствах будут развиваться. История философии дает нам не один пример преимуществ, которые могут дать гипотезы, примененные с таких позиций, и заблуждений, которым мы подвергаемся, приписывая им реальность.

Птолемей подтвердил движение равноденствий, открытое Гиппархом. Сравнивая свои наблюдения с наблюдениями своих предшественников, он установил взаимную неподвижность звезд, их почти постоянную широту и их движение по долготе, которое он получил таким же, какое предполагалось Гиппархом. В настоящее время мы знаем, что это движение гораздо значительнее; это, имея в виду интервал времени, разделивший этих двух астрономов, заставляет подозревать большие ошибки в их наблюдениях. Несмотря на трудность, которую представляло определение долготы звезд для наблюдателей, не знающих способа точно измерять время, удивительно, что они совершили эти ошибки, особенно, если учесть согласие наблюдений, приведенных Птолемеем в подтверждение своего вывода. Его упрекали в том, что он их изменил, но этот упрек необоснован. Его ошибка в годичном движении равноденствий, как мне представляется, произошла из-за его слишком большого доверия к продолжительности, которую Гиппарх приписывал тропическому году. В самом деле, Птолемей определял долготы звезд, сравнивая их с положением Солнца при помощи Луны или с положением самой Луны, что сводится к их сравнению с положением Солнца, поскольку синодическое движение Луны было хорошо известно по затмениям. А так как Гиппарх принял слишком длинный тропический год и, следовательно, движение Солнца по отношению к равноденствиям меньше истинного, ясно, что эта ошибка уменьшила долготы Солнца, использованные Птолемеем. Поэтому годичное движение по долготе, которое он приписывал звездам, должно быть увеличено на дугу, описанную Солнцем за время, равное ошибке Гиппарха в продолжительности года, и тогда оно становится почти таким, каким должно быть. Поскольку звездный год равен тропическому, увеличенному на время, необходимое Солнцу, чтобы описать дугу, равную годичному движению равноденствий, ясно, что звездный год Гиппарха и Птолемея должен мало отличаться от истинного. Действительно, эта разность равна лишь 1/10 разности, существующей между их тропическим годом и нашим.

Эти замечания наводят на мысль исследовать, является ли каталог Птолемея, как это обычно думают, каталогом Гиппарха, приведенным к времени Птолемея с помощью прецессии в $1^g$ за 90 лет; при этом основываются на том, что постоянная ошибка в долготах звезд этого каталога исчезает, если его относить к времени Гиппарха. Но данное нами объяснение этой ошибки освобождает Птолемея от упреков в присвоении работы Гиппарха, и, по-видимому, можно ему верить, когда он определенно говорит, что наблюдал звезды этого каталога, включая даже звезды шестой величины. Одновременно он замечает, что снова получал положения звезд, почти совпадающие с положениями, определенными Гиппархом по отношению к эклиптике, и мы тем более склонны этому верить, потому что Птолемей все время старается приблизиться к результатам этого великого астронома, который, в самом деле, был более точным наблюдателем.

Птолемей записал в храме Сераписа в Канопе главные элементы своей астрономической системы. Эта система использовалась в течение

четырнадцати веков. Даже теперь, когда она полностью отвергнута, «Альмагест», рассматриваемый как хранилище древних наблюдений, является одним из драгоценнейших памятников древности. К несчастью, он содержит лишь небольшое число наблюдений, сделанных до того времени. Автор внес в него только наблюдения, необходимые ему для установления своих теорий. Поскольку астрономические таблицы были уже составлены, он счел бесполезным вместе с ними передавать потомкам наблюдения Гиппарха и свои, использованные для их составления. Его примеру последовали арабы и персы. Большие собрания точных наблюдений, собранные исключительно ради них самих и без всякого приложения к теории, принадлежат современной астрономии и являются одним из наилучших средств ее усовершенствования.

Птолемей оказал большую услугу географии, собрав все определения долгот и широт известных мест и набросав основы метода проекций для составления географических карт. Он написал трактат по оптике, в котором подробно изложил явление астрономической рефракции. Он также является автором различных работ по музыке, хронологии, гномонике и механике. Такое множество работ по столь различным предметам предполагает обширный ум и обеспечивает ему выдающееся положение в истории науки. Когда его система уступила свое место естественной системе, ее автору стали мстить за тот деспотизм, с которым она слишком долго царила в астрономии. Птолемея обвинили в присвоении открытий его предшественников. Но благородная манера, с которой он очень часто цитирует Гиппарха в подтверждение своих теорий, полностью снимает с него эти обвинения. При возрождении наук среди арабов и в Европе эти гипотезы, объединяя в себе притягательность новизны и авторитет старины, были широко приняты умами, жаждущими знания и неожиданно увидевшими в своем распоряжении все достижения древности, полученные путем долгих трудов. Их благодарность слишком высоко подняла Птолемея, которого затем слишком принизили. Его репутация претерпела такую же судьбу, как репутация Аристотеля и Декарта, их ошибки были замечены только после того, как от слепого восхищения перешли к неоправданному пренебрежению, так как даже в науках самые полезные революции не были свободны от страстей и несправедливости.

## Глава III

## ОБ АСТРОНОМИИ С ПТОЛЕМЕЯ ДО ЕЕ ВОЗРОЖДЕНИЯ В ЕВРОПЕ

Работами Птолемея завершается развитие астрономии Александрийской школы. Эта школа существовала еще пять веков, но последователи Птолемея ограничивались комментированием его работ, ничего не прибавляя к его теориям, и почти все явления, происходившие на небе за время, большее шести столетий, не имели наблюдателей. Рим, долго

бывший обителью добродетелей, славы и литературы, не сделал ничего полезного для науки. В этой республике увлечение ораторским искусством и военными доблестями увлекло все умы. Науки, не доставляя никаких преимуществ, находились в пренебрежении среди завоеваний, совершать которые Рим толкало тщеславие, и внутренних раздоров, перешедших в конце концов в гражданские войны, в которых его тревожная свобода погибла и сменилась грозным деспотизмом его императоров. Распад империи, неизбежное следствие ее слишком большой протяженности, привел ее к упадку; и светоч знаний, потушенный нашествиями варваров, зажегся вновь только у арабов.

Этот народ, экзальтированный фанатизмом новой религии, после того, как его могущество и эта религия распространились на большую часть Земли, едва успев отдохнуть в мире, с жаром отдался наукам. Около середины VIII в. калиф аль-Мансур особенно поощрял астрономию. Но среди арабских правителей, отличавшихся своей любовью к наукам, история упоминает главным образом аль-Мамуна из семьи Абассидов, сына знаменитого Гарун аль-Рашида. Аль-Мамун правил в Багдаде в 814 г. Победив греческого императора Михаила III, он потребовал, как одно из условий мира, чтобы ему передали лучшие книги Греции. «Альмагест» оказался в их числе. Он приказал перевести его и распространил таким образом среди арабов астрономические знания, прославившие Александрийскую школу. Чтобы развить их далее, он пригласил избранных астрономов, которые, сделав большое число астрономических наблюдений, опубликовали новые таблицы Солнца и Луны, более совершенные, чем таблицы Птолемея, и в течение долгого времени известные на Востоке под названием «Исправленных таблиц». В этих таблицах солнечный перигей имеет правильное положение, а уравнение центра Солнца, слишком большое у Гиппарха, приведено к его истинной величине. Но это уточнение сделалось источником ошибок в вычислениях затмений, где годичное движение Луны частично исправляло неточность уравнения центра Солнца, принятого этим астрономом. Продолжительность тропического года точнее, чем у Гиппарха, но все же слишком коротка, приблизительно на 2 мин. Эта ошибка вызвана тем, что авторы «Исправленных таблиц» сравнивали свои наблюдения с наблюдениями Птолемея. Ошибка была бы близкой к нулю, если бы они для сравнения использовали наблюдения Гиппарха. По этой же причине они несколько преувеличили прецессию равноденствий.

Аль-Мамун повелел в обширной равнине Месопотамии с большой тщательностью измерить земной градус, который оказался равным 200 500 черных локтей. Это измерение содержит такую же неопределенность, как и измерение Эратосфена в отношении длины использованной меры. Все эти измерения могли бы нас теперь заинтересовать только возможностью узнать эти меры, но погрешности, сопровождавшие в то время подобные операции, не позволяют извлечь из них эту выгоду, которую могут дать только точные, современные измерения, с помощью которых всегда можно будет восстановить наши меры, если с течением времени их эталоны изменятся.

Поощрение, оказанное астрономии аль-Мамуном и его преемниками, способствовало появлению большого числа очень достойных уважения арабских астрономов, среди которых выдающееся место занимает аль-Батани. Этот арабский принц делал свои наблюдения в Аракте около 880 г. Его трактат «Наука о звездах» содержит множество интересных наблюдений и главные элементы солнечной и лунной теорий. Они очень мало отличаются от элементов, полученных другими астрономами аль-Мамуна. Его работа долгое время была единственным арабским трудом по астрономии, и ему приписали полезные изменения, внесенные в элементы таблиц Птолемея. Но драгоценный фрагмент, извлеченный из «Астрономии» Ибн-Юнуса и любезно переведенный по моей просьбе г-ном Коссеном, показал нам, что эти изменения были введены авторами «Исправленных таблиц». Кроме того, он дал нам точные и пространные сведения об арабской астрономии. Ибн-Юнус, астроном египетского калифа Хакема, занимался наблюдениями в Каире около 1000 г. Он написал большой труд по астрономии и составил знаменитые на Востоке, благодаря их точности, таблицы небесных движений; эти таблицы, по-видимому, послужили основой таблиц, составленных позже арабами и персами. В этом фрагменте, начиная с века аль-Мансура до времен Ибн-Юнуса, мы видим длинный ряд наблюдений затмений, равноденствий, солнцестояний, соединений планет и покрытий звезд, наблюдений, очень важных для улучшения астрономических теорий, позволивших узнать вековое уравнение Луны и проливших свет на большие изменения в системе мира. Эти наблюдения составляют лишь малую часть из огромного числа сделанных арабскими астрономами.

Арабы обнаружили неточность птолемеевых наблюдений равноденствий и, сравнив свои наблюдения как между собой, так и с наблюдениями Гиппарха, установили с большой точностью длину года. Длина года, выведенная Ибн-Юнусом, не превышает даже на 13 с нашу, которую она должна была превышать на 5 с. По его работе и по названиям нескольких рукописей, хранящихся в наших библиотеках, можно думать, что арабы специально занимались улучшением астрономических инструментов. Труды, которые они оставили, доказывают, что они считали этот предмет важным, и это обеспечило правильность их наблюдений. Особое внимание они уделяли измерению времени с помощью клепсидр, гигантских солнечных часов и даже по качаниям маятника. Несмотря на это, их наблюдения затмений представляются почти столь же неточными, как наблюдения халдеев и греков, а их наблюдения Солнца и Луны далеки от того, чтобы превзойти наблюдения Гиппарха настолько, чтобы это компенсировало преимущества, даваемые промежутком времени, отделяющим нас от этого великого наблюдателя. Деятельность арабских астрономов, ограничивавшихся наблюдениями, не распространялась на поиски новых неравенств. В этом они ничего не прибавили к гипотезам Птолемея. То живое любопытство, которое привлекает нас к явлениям до тех пор, пока не станут хорошо известными их причины и законы, характеризует лишь современных европейских ученых.

Персы, долгое время подчиненные тем же правителям, что и арабы,

и исповедывавшие ту же религию, около середины XI в. сбросили иго калифов. В эту эпоху стараниями астронома Омара Хайама их календарь получил новую форму, основанную на остроумном включении восьми високосных годов в 33-летний период, включении, которое в конце прошлого века Доминико Кассини предложил как более точное и простое, чем григорианское, не ведая, что персы уже давно его применяли. В XIII в. Хулагу, один из их властителей, собрал в Мараге наиболее образованных астрономов и приказал построить там великолепную обсерваторию, директором которой назначил Насирэддина. Но ни один правитель из этой нации не отличался такой страстью к астрономии, как Улугбек, которого надо отнести к числу наиболее великих наблюдателей. Он сам составил в Самарканде, столице его государства, новый каталог звезд и самые лучшие астрономические таблицы из всех, составленных до Тихо Браге. В 1437 г. с помощью огромного инструмента он измерил наклонность эклиптики. И его результат после учета влияния рефракции и исправления ошибочно внесенного параллакса дал эту наклонность, большую, чем в начале нашего века, что подтверждает ее последовательное уменьшение.

Летописи Китая дали нам самые древние астрономические наблюдения. А двадцатью четырьмя веками позднее они же дают нам наиболее точные наблюдения, какие были сделаны до возрождения астрономии и даже до применения телескопов с квадрантами. Мы видели, что астрономический год в Китае начинался с зимнего солнцестояния и что для установления его начала наблюдали полуденные тени гномона около солнцестояний.

Гобиль, один из наиболее знающих и рассудительных иезуитских миссионеров, посланных в эту империю, познакомил нас с рядом наблюдений такого рода, продолжавшихся с 1100 г. до н. э. по 1280 г. н. э. Они с очевидностью указывают на уменьшение наклонности эклиптики, которое в этом длинном интервале было равно одной тысячной окружности. Цзу Чун-чжи, один из наиболее искусных китайских астрономов, сравнивая наблюдения, сделанные им в Нанкине в 461 г., с теми, которые были сделаны в Лояне в 173 г., определил величину тропического года более точно, чем это сделали греки и даже астрономы аль-Мамуна. Он нашел его равным 365.24282 суток, почти таким же, как Коперник. В то время как Хулагу способствовал процветанию астрономии в Персии, его брат Хубилай, основавший в 1271 г. династию Юань, оказывал такое же покровительство астрономии в Китае. Он назначил главой математической коллегии Го Шоуцзина, первого из китайских астрономов. Этот великий наблюдатель приказал сделать гораздо более точные инструменты, чем те, которые были в употреблении до него. Самым ценным из них был гномон в 40 китайских футов, оканчивавшийся медной пластинкой с отверстием диаметром в толщину иглы. От центра этого отверстия он считал высоту гномона. Он измерял тень до центра изображения Солнца. Он говорил:

«До сих пор наблюдали только верхний край Солнца, и было трудно различить конец тени. Кроме того, гномон в восемь футов, которым по-

стоянно пользовались, слишком короток. Эти соображения привели меня к употреблению гномона в сорок футов и к наблюдению центра изображения». Гобиль, у которого мы взяли эти подробности, сообщил нам некоторые из этих наблюдений, сделанных с 1277 по 1280 гг. Они ценны благодаря своей точности и неоспоримо доказывают уменьшение наклона эклиптики и эксцентриситета земной орбиты с той эпохи до наших дней. Го Шоуцзин в 1280 г. с замечательной точностью определил положение точки зимнего солнцестояния относительно звезд. Он совмещал его с апогеем Солнца, что имело место 30 годами раньше. Принятая им величина года в точности равна нашему григорианскому году. Китайские методы вычисления затмений хуже арабских и персидских. Несмотря на частые встречи с ними, китайцы не использовали знаний, приобретенных этими народами. Они распространяли даже на астрономию свою постоянную приверженность древним обычаям.

История Америки, до ее завоевания испанцами, сохранила нам некоторые следы астрономии, так как самые элементарные представления об этой науке у всех народов были первыми плодами их цивилизации. Мексиканцы вместо недели использовали небольшой период в 5 дней, их месяцы были по 20 дней, и 18 таких месяцев составляли год, начинавшийся в день зимнего солнцестояния. К нему они прибавляли 5 дополнительных дней. Есть основания считать, что они составляли большой цикл из 104 лет, в который вставляли 25 дополнительных дней. Это предполагает продолжительность тропического года, более соответствующую истинной, чем у Гиппарха, и примечательно, что она почти такая же, как у астрономов аль-Мамуна. Перуанцы и мексиканцы тщательно наблюдали тени гномона в солнцестояниях и равноденствиях. Для этой цели они построили даже колонны и пирамиды. Однако, если учесть трудность столь точного определения длины года, склоняешься к мысли, что это не их работа и что это определение пришло к ним из Старого Света. Но от какого народа и каким способом они ее получили? Почему, если оно было им передано через Северную Азию, у них было деление времени, столь отличающееся от употреблявшегося в этой части света? Эти вопросы, по-видимому, невозможно разрешить.

В многочисленных рукописях, хранящихся в наших библиотеках, есть много древних, еще не известных нам наблюдений, которые могли бы пролить свет на астрономию и, в особенности, на вековые неравенства небесных движений. Их изучение должно привлечь внимание ученых, знакомых с восточными языками, потому что большие изменения в системе мира не менее интересно знать, чем перевороты в истории государств. Последующие поколения, которые смогут сравнить длинный ряд очень точных наблюдений с теорией всемирного тяготения, воспользуются их согласием гораздо лучше нас, кому древние времена оставили чаще всего лишь ненадежные наблюдения. Но эти наблюдения, подвергнутые здоровой критике, смогут, хотя бы частично, компенсировать своим количеством ошибки, которым они подвержены, и возместить нам недостаток точных наблюдений, подобно тому, как в географии, чтобы установить положение места, дополняют иногда астрономические наблюдения, срав-

нивая между собой сообщения разных путешественников. Таким образом, хотя общая картина имеющихся наблюдений с самой глубокой древности до наших дней и очень несовершенна, все же в ней весьма явственно замечаются изменения эксцентриситета земной орбиты и положений ее перигея, вековые движения Луны по отношению к ее узлам, ее перигею и к Солнцу и, наконец, изменения элементов планетных орбит. Особенно заметно последовательное уменьшение наклонности эклиптики в течение почти трех тысяч лет, получаемое путем сравнения наблюдений Чжоу Гуна, Пифея, Ибн-Юнуса, Го Шоуцзина и Улугбека с современными.

## Глава IV

## ОБ АСТРОНОМИИ В СОВРЕМЕННОЙ ЕВРОПЕ

Современная Европа обязана первыми лучами света, рассеявшими мрак, окружавший ее больше двенадцати веков, главным образом арабам. Они достойно передали нам сокровища знаний, полученные ими от греков, которые сами были учениками египтян. Но по роковому стечению обстоятельств у всех этих народов накопленные знания исчезли после того, как они их передали другим.

Уже давно деспотизм, охвативший своим варварством прекрасные страны, бывшие колыбелью наук и искусств, изгладил даже воспоминание о науках и искусствах, вплоть до имен великих людей, которые их прославили.

Альфонс, король Кастилии, был одним из первых правителей, поощрявших возрождающуюся в Европе астрономию. Эта наука насчитывает мало столь ревностных покровителей. Но собранные им астрономы плохо поддержали его, и опубликованные ими таблицы не стоили тех непомерных затрат, которых они потребовали. Одаренный здравомыслием, Альфонс был приведен в смущение путанным скоплением кругов и эпициклов, по которым заставляли двигаться небесные тела. «Если бы бог, — сказал он, — позвал меня для совета, все было бы в большем порядке». Этими словами, которые были расценены как безбожные, он дал понять, что мы еще далеки от познания механизма вселенной. Во времена Альфонса Европа благодаря поощрению императора Германии Фридриха II получила первый латинский перевод «Альмагеста» Птолемея, сделанный с арабского языка.

Наконец, мы достигаем эпохи, в которой астрономия, выйдя из узкой, закрытой сферы, где она пребывала до тех пор, поднялась путем быстрых и постоянных успехов на ту высоту, где мы ее видим теперь. Пурбах, Региомонтан, Вальтер подготовили эти прекрасные дни науки, и Коперник дал им начало, счастливо объяснив небесные явления вращением Земли вокруг себя и Солнца. Потрясенный, как и Альфонс, чрезвычайной сложностью системы Птолемея, он искал у древних философов более простое объяснение вселенной. Он узнал, что некоторые из них считали, что Венера и Меркурий обращаются вокруг Солнца, что Нисетас, по словам

Цицерона, приписал Земле вращение вокруг своей оси и этим избавил небесную сферу от непостижимой скорости, которую приходилось приписывать ей, чтобы выполнялось суточное вращение. Аристотель и Плутарх указали ему, что пифагорейцы заставляли Землю и планеты двигаться вокруг Солнца, которое они помещали в центр мира. Эти ослепительные идеи его поразили. Он приложил их к астрономическим наблюдениям, которые накопились со временем, и получил удовлетворение, увидев, что они без труда укладываются в теорию движения Земли. Суточное вращение неба оказалось лишь иллюзией, вызванной вращением Земли, а прецессия равноденствий свелась к движению земной оси. Круги, придуманные Птолемеем, чтобы объяснить прямые и попятные движения планет, исчезли. Коперник увидел в этих движениях только кажущиеся явления, вызванные сочетанием движения Земли и планет вокруг Солнца, и вывел относительные диаметры их орбит, до того времени не известные. Наконец, все говорило в этой системе о той прекрасной простоте, которая очаровывает нас в средствах природы, когда нам посчастливится их узнать. Коперник опубликовал свой труд под названием «Об обращениях небесных сфер». Чтобы не возмущать установившиеся предрассудки, он представил его как гипотезу.

«Как астрономы, — сказал он в своем посвящении папе Павлу III,— позволили себе вообразить окружности для объяснения движений небесных светил, так и я подумал, что могу равным образом исследовать, не приведет ли предположение о движении Земли к большей точности и простоте теорию этих движений».

Этот великий человек не был свидетелем успеха своей работы. Он умер почти скоропостижно в возрасте 71 года, после получения первого экземпляра своей книги. Родившийся в Торне [Торуни], в польской Пруссии, 19 февраля 1473 г., он изучил в отеческом доме греческий и латинский языки и продолжил свои занятия в Кракове. Затем, увлеченный своей любовью к астрономии и славой Региомонтана, желая прославиться на том же поприще, он предпринял путешествие в Италию, где эта наука успешно преподавалась. В Болонье он слушал лекции Доминико Мариа, а потом получил место профессора в Риме, где сделал различные наблюдения. Наконец, он покинул этот город и поселился в Фрауенбурге [Фромборке], где его дядя, в то время епископ Вармии, предложил ему место каноника. Здесь в спокойствии, после тридцати шести лет наблюдений и размышлений, он создал свою теорию движения Земли. После смерти он был погребен без всяких почестей и без эпитафии во Фрауенбургском кафедральном соборе. Но память о нем будет жить так же долго, как и великие истины, которые он раскрыл с такой очевидностью, что, в конце концов, они рассеяли обманы чувств и преодолели все трудности, противопоставлявшиеся им неведением законов механики.

Эти истины еще должны были победить препятствия другого рода, которые, появившись в весьма почтенных кругах, задушили бы эти истины, если бы быстрый прогресс всех математических наук не сумел их отстоять. Чтобы разрушить астрономическую систему, была призвана религия, и, ссылаясь на нее, неоднократно повторяющимися преследова-

циями терзали одного из ее защитников, открытия которого прославили Италию. Ретик, ученик Коперника, был первым, принявшим его идеи. Но они не встретили большого признания до начала XVII в., когда они получили это признание главным образом благодаря трудам и несчастьям Галилея.

К тому времени счастливый случай позволил найти самый замечательный инструмент, который человеческое искусство когда-либо открывало и который, дав астрономическим наблюдениям неожиданный размах и точность, позволил обнаружить в небесах новые миры и новые неравенства. Галилей, едва ознакомившись с первыми попытками использования телескопа, решил его усовершенствовать. Направив его на небесные светила, он открыл четыре спутника Юпитера, которые продемонстрировали ему еще одну аналогию Земли с планетами. Затем он увидел фазы Венеры и с тех пор не сомневался в ее движении вокруг Солнца. Млечный путь явил ему бесконечное число слабых звезд, которые при рассмотрении невооруженным глазом смешивались из-за иррадиации в сплошное белое свечение. Светящиеся точки, увиденные им за линией, разделяющей светлую и темную части Луны, позволили узнать, что на Луне есть горы, и определить их высоту. Наконец, он увидел пятна на Солнце и обнаружил его вращение, странные виды Сатурна, вызываемые его кольцом. Публикуя эти открытия, он показал, что они доказывают движение Земли. Но мысль об этом движении была объявлена собором кардиналов противоречащей религиозным догмам. И Галилей, самый знаменитый ее защитник в Италии, был осужден трибуналом инквизиторов и был принужден от нее отречься, чтобы избежать жестокой тюрьмы.

У гениального человека одна из самых сильных страстей — это любовь к истине. Полный энтузиазма, вдохновленный великим открытием, он горит желанием о нем поведать. А препятствия, которые ставят ему невежество и предрассудки людей, наделенных властью, только возбуждают его и увеличивают его энергию. К тому же вопрос касался истины, имевшей для нас огромное значение из-за того, какой ранг отводила она Земле, на которой мы живем. Если Земля действительно неподвижна в середине вселенной, человек имеет право рассматривать себя как главный предмет забот природы. Все мнения, основанные на этой прерогативе, заслуживают его рассмотрения. Он может тогда обоснованно стараться найти отношения, в которых светила находятся с его судьбой. Но если Земля — только одна из планет, которые движутся вокруг Солнца, эта Земля, уже такая маленькая в солнечной системе, целиком исчезает в бесконечности небес, в которой вся эта система, какой бы обширной ни казалась она нам, составляет лишь неощутимую часть. Галилей, благодаря своим наблюдениям, все более и более убеждавшийся в движении Земли, долго раздумывал о новом сочинении, в котором он хотел развить доказательства этого движения. Чтобы избавиться от преследований, жертвой которых он едва не стал, он решил представить сочинение в виде диалогов между тремя собеседниками; из них один защищал систему Коперника, оспариваемую перипатетиком. Чувствовалось, что все преимущества правоты были на стороне защитника этой системы; но Галилей,

не высказывая своего мнения в споре между ними и, насколько это было возможно, давая оценить возражения сторонников Птолемея, надеялся сохранить покой, который был заслужен его трудами и старостью. Успех этих диалогов и убедительность, с которой в них были опровергнуты все возражения против движения Земли, пробудили инквизицию. Галилей в возрасте 70 лет снова был вызван на ее суд. Протекция великого герцога Тосканы не смогла воспрепятствовать тому, чтобы Галилей перед ним предстал. Его заключили в тюрьму, где потребовали от него вторичного отказа от его мнения под угрозой наказания за вторичное впадение в ересь, если он будет продолжать распространять ту же доктрину. Его заставили подписать такую формулировку отречения: «Я, Галилей, на 70-м году жизни лично представ перед правосудием, стоя на коленях и имея перед глазами святое евангелие, которого я касаюсь своими собственными руками, с искренним сердцем и верой отрекаюсь, проклинаю и ненавижу заблуждение, ересь о движении Земли и т. д.» Какое зрелище, когда старец, прославленный долгой жизнью, посвященной целиком изучению природы, отрекается на коленях вопреки свидетельству своей совести от истины, доказанной им с очевидностью! Заключенный в тюрьму на неограниченное время декретом инквизиции, он был обязан великому герцогу своим освобождением. Но чтобы помешать ему избавиться от власти инквизиции, ему было запрещено покидать пределы Флоренции. Галилей родился в Пизе в 1564 г. С самых юных лет в нем проявился ряд талантов, которые развились в дальнейшем. Механика обязана ему многими открытиями, из которых наиболее важной была теория движения тяжелых тел. Она является лучшим памятником его гению. Под конец жизни он потерял зрение; это совпало с его изучением либрации Луны. Тремя годами позже, в 1642 г., он умер в Арчетри,* к огорчению всей Европы, просвещенной его работами и негодующей на судебный приговор, вынесенный великому человеку ненавистным трибуналом.

Пока все эти события происходили в Италии, Кеплер в Германии открывал законы планетных движений. Но прежде чем излагать эти открытия, следует вернуться несколько назад и ознакомиться с прогрессом астрономии на севере Европы после смерти Коперника.

История этой науки дает нам в ту эпоху большое число превосходных наблюдателей. Одним из наиболее выдающихся среди них был Вильгельм IV, ландграф Гессен-Касселя. Он приказал построить в Касселе обсерваторию, снабженную тщательно сделанными инструментами, с которыми он сам долгое время производил наблюдения. Он пригласил двух видных астрономов, Ротмана и Иоста Бюрга. Тихо Браге также был обязан настойчивым ходатайствам ландграфа перед Фридрихом, королем Дании, за то покровительство, которое король ему оказал.

Тихо Браге, один из величайших наблюдателей, которые когда-либо жили родился в конце 1546 г. в Кнудструпе, в Скании [Дании]. Его любовь к астрономии проявилась уже в 14 лет в связи с затмением, случившимся в 1560 г. В этом возрасте дети так редко склонны к размышлениям, но точность, с которой было предсказано это явление, вызвала в нем силь-

* Арчетри — предместье Флоренции (Прим. ред.).

ное желание узнать принципы таких вычислений. Это желание еще возросло из-за противодействия его воспитателя и семьи. Он поехал в Германию, где установил связи и дружескую переписку с самыми видными учеными и любителями астрономии, особенно с ландграфом Гессен-Касселя, принявшим его самым любезным образом. Вернувшись на родину, он был замечен своим сувереном, королем Фридрихом, отдавшим ему маленький остров Вен у входа в Балтийское море. Тихо построил там ставшую знаменитой обсерваторию, названную Уранибургом. Там в течение 21 года он сделал огромное число наблюдений и несколько важных открытий. После смерти Фридриха зависть, обрушившаяся на Тихо, заставила его покинуть свое убежище. Его возвращение в Копенгаген не угомонило ярости его преследователей. Один из министров, Вальхендорп (его имя, как и имена всех людей, которые злоупотребляли властью, чтобы остановить прогресс разума, должно быть предано презрению на все века), запретил ему продолжать свои наблюдения. К счастью, Тихо нашел себе могущественного покровителя в лице императора Рудольфа II, который привлек его значительной пенсией и дал ему в Праге обсерваторию. Неожиданная смерть застала его в этом городе 24 октября 1601 г. среди трудов в возрасте, в котором он мог бы еще оказать астрономии большие услуги.

Изобретение новых инструментов, усовершенствование прежних, высокая степень точности наблюдений, создание каталога звезд, значительно превосходящего каталоги Гиппарха и Улугбека, открытие лунного неравенства, названного им *вариацией,* и неравенств движения ее узлов и наклона лунной орбиты, важные замечания о том, что кометы движутся далеко за пределами этой орбиты, более совершенное знакомство с астрономической рефракцией, наконец, большое количество наблюдений планет — эти наблюдения послужили основой для вывода законов Кеплера — вот каковы главные заслуги Тихо Браге перед астрономией. Точность его наблюдений, которой он обязан своими открытиями, относящимися к лунным движениям, позволила ему также узнать, что уравнение времени, относящееся к Солнцу и планетам, нельзя применять к Луне и что необходимо вычитать из него часть, зависящую от аномалии Солнца, и даже значительно большую величину. Кеплер, увлеченный своим воображением на поиски соотношений и причин явлений, думал, что двигательное свойство Солнца заставляет Землю вращаться вокруг себя быстрее в перигелии, чем в афелии. Влияние этого изменения суточного движения могло быть обнаружено наблюдениями Тихо только в движении Луны, у которой оно в 13 раз больше, чем у Солнца. Но так как часы, усовершенствованные применением маятников, показали, что в этом последнем движении влияние изменения суточного движения равно нулю и что скорость вращения Земли постоянна, Флемстид перенес на движение Луны неравенство, зависящее от аномалии Солнца, которое раньше считалось только кажущимся. Это неравенство, впервые обнаруженное Тихо Браге, называют *годичным уравнением.* На этом примере мы видим, как усовершенствование наблюдений открывает нам неравенства, скрытые до этого в их ошибках. Изыскания Кеплера дают тому еще более замечательный

пример. Показав в своих записках о Марсе, что гипотезы Птолемея неизбежно отклоняются от наблюдений Тихо на восемь шестидесятеричных минут, он прибавляет: «Эта разница меньше, чем возможная погрешность наблюдений Птолемея, которая, по признаниям этого астронома, достигала, по крайней мере, десяти минут. Но божественная доброта явила нам в лице Тихо Браге очень точного наблюдателя, и справедливо признать это благодеяние божества и возблагодарить его за это. Убедившись теперь в ошибочности гипотез, которые мы до сих пор употребляли, мы должны направить все наши усилия на то, чтобы открыть истинные законы небесных движений. Эти восемь минут, которыми теперь нельзя пренебрегать, направили меня по пути полного преобразования астрономии, что составляет большую часть этой работы».

Пораженный возражениями, которые противники Коперника противопоставляли движению Земли, и, может быть, побуждаемый честолюбивой мыслью дать свое имя новой астрономической системе, Тихо Браге, не поняв истинной системы природы, предположил, что Земля неподвижна в центре вселенной, что все светила движутся каждый день вокруг оси мира и Солнце в своем годичном движении уносит с собой планеты. В этой системе, которая, по естественному порядку идей, должна была бы предшествовать системе Коперника, видимые движения остаются такими же, как и в теории движения Земли. Вообще, можно рассматривать любую точку, например центр Луны, как неподвижную, при условии, что ее движение в противоположном направлении передается всем другим светилам. Но не абсурдно ли с точки зрения физики предполагать Землю неподвижной в пространстве, тогда как Солнце увлекает все планеты, в число которых входит и Земля? Расстояние Земли от Солнца при предположении, что она движется, так хорошо согласуется с продолжительностью ее обращения, что это не может оставлять сомнения у разумного человека, способного почувствовать силу аналогии. И не следует ли вместе с Кеплером сказать, что природа громким голосом провозглашает истинность этой гипотезы? Нужно признать, что Тихо Браге, хотя и был великим наблюдателем, не был удачлив в объяснении причин явлений. Его не очень философский ум был даже подвержен астрологическим предрассудкам, которые он пытался защищать. Однако было бы несправедливо осуждать его так же строго, как тех, кто в наши дни отказывается от теории движения Земли, подтвержденной многочисленными открытиями, сделанными с тех пор в астрономии. Трудности, которые обманы чувств ставили перед этой теорией, еще не были преодолены. То, что у звезд имелся видимый диаметр, превышавший их годичный параллакс, давало звездам, по этой теории, истинный диаметр, превышающий диаметр земной орбиты. Телескоп, уменьшив звезды до размеров светящихся точек, исключил эту неправдоподобную величину. Не было понятно, как тела, отдаленные от Земли, могли следовать ее движениям. Законы механики объясняли эти видимые явления. Они показали то, что Тихо, обманутый ложным опытом, отказывался признать — что тело, освобожденное на большой высоте и предоставленное одному только действию силы тяжести, падает очень близко к основанию вертикали, откло-

няясь от нее на восток на величину, которую очень трудно наблюдать вследствие ее крайней малости. Так что трудности, испытываемые теперь, если мы хотим обнаружить движение Земли, наблюдая падение тел, так же велики, как те трудности, которые испытывали тогда, доказывая, что это движение должно быть неощутимо.

Реформа юлианского календаря относится ко времени Тихо Браге. Полезно привязать месяцы и праздники к одним и тем же временам года и создать из них периоды, связанные с земледелием. Но чтобы получить это ценное для жителей сельской местности преимущество, надо путем регулярной вставки одних суток компенсировать избыток солнечного года над гражданским, имеющим 365 суток. Самый простой способ вставки был введен Юлием Цезарем в римский календарь. Он заключается в том, что один високосный год следует после каждых трех простых лет. Но продолжительность года, получаемого таким способом, слишком велика, так что точка весеннего равноденствия непрерывно предваряется. За пятнадцать веков, протекших с эпохи Юлия Цезаря, она приблизилась на $11\,^1/_2$ суток к началу года. Чтобы устранить это неудобство, папа Григорий XIII распорядился своим декретом в 1582 г., чтобы месяц октябрь этого года имел только 21 день, 1600 год был високосным и чтобы затем годы, заканчивающие каждое столетие, были високосными только через каждые четыре века. Такое включение, основанное на немного удлиненном годе, упреждало точки весеннего равноденствия на одни сутки приблизительно за четыре тысячи лет. Однако если сделать обычным високосный год, заканчивающий этот период, григорианское включение становится почти совершенно точным. В остальном юлианский календарь не был изменен. Если бы это было сделано, было бы легко приурочить начало года к зимнему солнцестоянию и сделать более регулярной длину месяцев, назначив 31 день — первому, 29 второму в обычные годы и 30 — в високосные и делая остальные месяцы года попеременно в 31 и 30 дней. Было бы удобно обозначать их по порядку их следования, что уничтожило бы неподходящие названия последних четырех месяцев года. Исправив затем, как было сказано, принятое включение дней, мы получили бы григорианский календарь, не оставляющий желать ничего лучшего. Но следует ли стремиться к этому улучшению? Если принять во внимание, что существующий календарь сегодня принят почти у всех народов Европы и Америки и потребовалось два века и огромное влияние церкви, чтобы обеспечить ему это преимущество, можно понять, что его следует сохранить даже с его недостатками, которые к тому же не влияют на его наиболее существенные свойства, так как главная задача календаря состоит в том, чтобы связать путем простейшей вставки события с последовательностью дней и заставить времена года в течение очень большого числа веков совпадать с одними и теми же месяцами. А эти условия хорошо выполняются в григорианском календаре. Часть этого календаря, относящаяся к определению дня пасхи, по своему смыслу не относится к астрономии, и о ней я здесь не буду говорить.

В свои последние годы Тихо Браге имел учеником и помощником Кеплера, родившегося в 1571 г. в Вейле в Вюртембергском герцогстве. Он

был одним из тех редких людей, которых природа время от времени дает науке для создания великих теорий, подготовленных трудами многих веков. Карьера ученого сперва показалась ему неподходящей для удовлетворения его честолюбивых замыслов. Но его растущий гений и увещания Местлина привлекли его к астрономии, и он направил на нее всю энергию своей души, жаждущей славы.

Сгорая от нетерпения узнать причину явления, ученый, одаренный живым воображением, часто предвосхищает события, т. е. устанавливает причину прежде, чем наблюдения могли бы его к ней подвести. Конечно, было бы вернее восходить от явлений к их причинам, но история науки показывает нам, что этот медленный и тяжелый путь не всегда был использован открывателями. Скольких неожиданных опасностей должен остерегаться тот, кто руководствуется своим воображением! Настроенный заранее в пользу причины, представляемой его воображением, и далекий от мысли отказаться от нее, если факты ей противоречат, он их изменяет, чтобы втиснуть в свои гипотезы. Он калечит, если можно так выразиться, творение природы, чтобы заставить его быть похожим на воображаемый им образ, не думая о том, что время рассеет эти пустые призраки и утвердит только результаты наблюдений и вычислений. Действительно полезен для прогресса науки тот философ, который соединяет яркое воображение с большой строгостью в рассуждениях и опытах и одновременно обуреваем желанием подняться до познания причин явлений и боязнью ошибиться в тех причинах, которые он им приписывает.

Кеплер по своему характеру обладал первым из этих достоинств, а Тихо Браге дополнял его, давая ему полезные советы, от которых он часто уклонялся, но всегда пользовался в тех случаях, когда мог сравнить свои предположения с наблюдениями, что, по методу исключения, приводило его от одной гипотезы к другой и наконец привело к закону планетных движений. Тихо Браге, этот великий наблюдатель, к которому Кеплер приехал в Прагу и который уже в первых работах своего помощника сумел распознать его гениальность среди мистических аналогий между фигурами и числами, которыми они были полны, побуждал своего ученика к наблюдениям. Он обеспечил ему титул императорского математика. Смерть Тихо, наступившая немного лет спустя после начала их совместной работы, предоставила в распоряжение Кеплера ценное собрание наблюдений его знаменитого учителя, и он употребил его самым полезным образом, основав на нем три самых важных открытия, которые когда-либо были сделаны в философии природы.

Случившееся тогда противостояние Марса побудило Кеплера заняться преимущественно движениями этой планеты. Его выбор был очень удачен, поскольку орбита Марса — одна из самых эксцентричных в планетной системе, и так как эта планета очень близко приближается к Земле во время своих оппозиций, неравенства ее истинного и видимого движений больше, чем у всех других планет, и поэтому позволяли легче и надежнее открыть их законы. Хотя теория движения Земли уничтожила большую часть кругов, которыми Птолемей загромоздил астрономию, все же Коперник оставил некоторые из них, чтобы объяснить истинные не-

равенства движения небесных тел. Кеплер, обманутый, как и он, мыслью, что движения небесных тел должны быть круговыми и равномерными, долго пытался представить движения Марса в соответствии с этой гипотезой. Наконец, после большого числа попыток, которые он подробно описал в своем сочинении «О движениях светила Марс», он преодолел препятствие, создаваемое ошибкой, утвержденной всеобщим одобрением во все века. Он обнаружил, что орбита Марса является эллипсом, один из фокусов которого занимает Солнце, и что планета движется так, что ее радиус-вектор, проведенный из ее центра к центру Солнца, описывает площади, пропорциональные времени. Кеплер распространил эти выводы на все планеты и в 1626 г. на основе этой теории опубликовал так называемые рудольфовы таблицы, навсегда оставшиеся памятными в астрономии, как первые таблицы, основанные на истинных законах системы мира и свободные от всех кругов, перегружавших предшествовавшие таблицы.

Если отделить астрономические изыскания Кеплера от химерических идей, которыми он часто сопровождал их, можно проследить, как он пришел к своим законам. Сперва он убедился, что равномерность углового движения Марса имела место только относительно точки, лежащей вне центра его орбиты по отношению к Солнцу. Он обнаружил то же самое и для Земли, сравнивая между собой избранные наблюдения Марса, орбита которого из-за большой величины ее годичного параллакса позволяет узнать относительные размеры орбиты Земли. Руководствуясь принципом, согласно которому фокусы небесных движений должны находиться в центрах больших притягивающих тел, Кеплер вывел, что истинные движения планет переменны и что в двух точках, где скорость наибольшая и наименьшая, площади, описанные в течение суток радиусом-вектором планеты вокруг Солнца, одинаковы. Это равенство площадей он распространил на все точки орбиты, что дало ему закон пропорциональности площадей и времени. Затем наблюдения Марса около его квадратур показали ему, что орбита этой планеты является овалом, вытянутым в направлении диаметра, соединяющего точки с экстремальными скоростями, что и привело его, наконец, к эллиптическому движению.

Если бы не древнегреческие исследования кривых, образованных сечениями конуса плоскостью, эти прекрасные законы, может быть, оставались бы неизвестными до сих пор. Так как эллипс является одной из таких кривых, его вытянутая форма зародила в уме Кеплера мысль направить движение планеты Марс по эллипсу. И вскоре, по множеству свойств, которые древние геометры нашли у конических сечений, он убедился в правильности своей гипотезы. История науки дает нам много примеров такого применения чистой геометрии и пользы, приносимой ею, потому что все связано в одну огромную цепь истин, и часто одного единственного наблюдения бывало достаточно, чтобы оплодотворить, казалось бы, самые отвлеченные понятия и перенести их в природу, явления которой — лишь математические следствия действия малого числа незыблемых законов.

Предчувствие этой истины, по-видимому, породило таинственные аналогии пифагорейцев. Они пленили Кеплера, и им он обязан одним из

своих самых прекрасных открытий. Убежденный, что средние расстояния планет от Солнца и их обращения должны определяться в соответствии с этими аналогиями, он долго сравнивал их как с правильными геометрическими телами, так и с интервалами звуковых тонов. Наконец, после 17 лет бесполезных проб, решив сравнить степени расстояний с временами звездных обращений, он нашел, что квадраты этих времен относятся между собой как кубы больших осей орбит. Этот очень важный закон, который ему удалось получить и для системы спутников Юпитера, распространяется на все системы спутников.

Узнав форму кривых, описываемых планетами вокруг Солнца, и открыв законы их движения, Кеплер оказался слишком близок к принципу, из которого эти законы вытекают, чтобы его не предугадать. Поиски этого принципа часто занимали его живое воображение. Но время сделать последний шаг еще не пришло, так как для этого было необходимо еще создать динамику и исчисление бесконечно малых. Близкий к своей цели, Кеплер свернул на путь тщетных спекулятивных измышлений о причине движения планет. Он предположил, что Солнце имеет вращательное движение вокруг оси, перпендикулярной к эклиптике. Нематериальные субстанции, излучаемые этим светилом в плоскости его экватора, наделенные активностью, уменьшающейся с расстоянием, и сохраняющие свое первоначальное вращательное движение, заставляют участвовать в этом круговом движении каждую планету. В то же время планета посредством какого-то инстинкта или магнетизма попеременно то приближается, то отдаляется от Солнца, поднимается или опускается выше или ниже солнечного экватора таким образом, что описывает эллипс, всегда расположенный в одной и той же плоскости, проходящей через центр Солнца. Среди этих многочисленных заблуждений Кеплер, однако, пришел к здравым взглядам на всемирное тяготение в сочинении «О движении светила Марс», где он изложил свои главные открытия. Он говорил:

«Сила тяготения не что иное, как взаимное стремление тел к объединению».

«Сила тяготения тел не направлена в центр мира, но к центру круглого тела, часть которого они составляют, и если бы Земля не была шарообразной, тяжелые тела, помещенные в разных точках ее поверхности, не падали бы все в направлении одного и того же центра».

«Два раздельных тела стремятся друг к другу как два магнита, перемещаясь, чтобы соединиться, на расстояния, обратно пропорциональном их массам. Если бы Земля и Луна не удерживались на том расстоянии, которое их разделяет, животной силой или какой-нибудь другой равноценной, они упали бы одна на другую. При этом Луна прошла бы 53/54 пути, а Земля — оставшуюся часть, если предположить, что их плотности одинаковы».

«Если бы Земля перестала притягивать к себе воды океанов, они переместились бы на Луну под влиянием силы притяжения этого светила».

«Эта сила, простирающаяся до Земли, производит явление морских приливов и отливов».

Таким образом, важное сочинение, которое мы цитировали, содержит первые зародыши небесной механики, которую Ньютон и его последователи так успешно развили.

Приходится удивляться, что Кеплер не применил законы эллиптического движения к кометам. Введенный в заблуждение пылким воображением, он упустил нить аналогий, которая должна была привести его к этому важному открытию. По его мнению, кометы были лишь метеорами, порожденными эфиром; он пренебрег изучением их движений и остановился на середине открытого им пути, оставив своим последователям часть славы, которую мог обрести. В его времена еще только начинали смутно видеть способы отыскания истины, к которой гений приходил интуитивно, часто смешивая ее со многими ошибками. Вместо того чтобы с трудом подниматься путем ряда индукций от частных явлений к другим, более общим, и от них к всеобщим законам природы, было гораздо приятнее и легче подчинить все явления отношениям соответствия и гармонии, которые воображение рождало и изменяло по своей прихоти. Так, Кеплер объяснял расположение тел солнечной системы законами музыкальной гармонии. Человеческому уму прискорбно видеть, как этот великий человек, даже в своих последних работах, находил удовольствие и наслаждение в этих химерических спекуляциях и считал их душой и жизнью астрономии. Их смешение с истинными открытиями, несомненно, было причиной, по которой астрономы его времени, даже Декарт и Галилей, которые могли многое извлечь из его законов, по-видимому, не почувствовали их важности. В пользу движения Земли Галилей мог бы сослаться на одно из самых сильных доказательств этого движения — на его согласие с законом эллиптического движения всех планет и в особенности с отношением квадратов времен обращения к кубам средних расстояний до Солнца. Но эти законы получили всеобщее признание только после того, как Ньютон основал на них свою теорию системы мира.

Астрономия обязана Кеплеру еще несколькими полезными трудами. Его работы по оптике полны новых и интересных идей. Он усовершенствовал телескоп и его теорию, объяснил неизвестный до него механизм зрения, правильно объяснил причину пепельного света Луны, но воздал должное своему учителю Местлину, заслуживающему уважения на это открытие и за то, что он привлек Кеплера к астрономии, а Галилея обратил к системе Коперника. Наконец, Кеплер в своем труде, названном «Стереометрия бочек», изложил такие взгляды на понятие бесконечности, которые повлияли на переворот в геометрии, испытанный ею в конце позапрошлого века, и Ферма, которого следует считать истинным изобретателем дифференциального исчисления, основал на нем свой прекрасный метод максимумов.

Имея такое неоспоримое право на восхищение, этот великий человек жил в нищете, в то время как астрология, везде находившаяся в почете, великолепно вознаграждалась. К счастью, удовлетворение от истины, открывающейся гениальному человеку, и перспектива, что справедливое и признательное потомство его оценит, утешали его среди неблагодарно-

сти современников. Кеплер получал пенсию, которую ему всегда плохо выплачивали. Поехав в сейм в Ратисбону [Регенсбург], чтобы испросить задолженность, он умер в этом городе 15 ноября 1631 г. В свои последние годы он имел счастье быть свидетелем появления логарифмов, открытых шотландским бароном Непером, и применять их. Эти логарифмы представляют удивительный прием, совершенствующий хитроумный индийский алгорифм, сокращающий до немногих дней работу нескольких месяцев, удваивающий, если можно так сказать, жизнь астрономов и избавляющий их от ошибок и отвращения, неизбежных при длинных вычислениях. Это изобретение тем более удовлетворяет человеческий ум, что оно целиком взято из его собственных возможностей: в делах рук своих человек использует материалы и силы, даваемые ему природой, чтобы увеличить свое могущество; но здесь все целиком является результатом работы его собственного ума.

Труды Гюйгенса последовали вскоре после трудов Кеплера и Галилея. Очень мало кто по важности и возвышенности своих изысканий имеет перед наукой такие заслуги, как Гюйгенс. Применение маятника в часах явилось одним из его лучших подарков, сделанных астрономии и географии, которые обязаны своим быстрым прогрессом этому счастливому изобретению, так же как изобретению телескопа, теорию и практику применения которого он значительно усовершенствовал. С помощью превосходных объективов, которые он сумел сделать, Гюйгенс узнал, что странные изменения вида Сатурна вызываются очень тонким кольцом, которым окружена эта планета. Его усердные наблюдения позволили ему открыть один из спутников Сатурна. Он опубликовал оба эти открытия в «Системе Сатурна», в сочинении, которое еще содержит некоторые следы тех пифагорейских идей, которыми Кеплер так злоупотреблял, но которые окончательно стерты истинным духом науки, столь преуспевшей в этом прекрасном веке. Открытие спутника Сатурна уравняло число спутников с числом известных тогда планет. Гюйгенс, считая это равенство необходимым условием гармонии системы мира, осмелился почти утверждать, что больше не остается спутников, которые можно было бы открыть. Но немногими годами позже у той же планеты Кассини обнаружил еще четыре спутника. Геометрия, механика и оптика обязаны Гюйгенсу многими открытиями; и если бы у этого редкого гения возникла идея соединить свои теоремы о центробежной силе с прекрасными исследованиями эволют и с законами Кеплера, он отнял бы у Ньютона его теорию криволинейного движения и всемирного тяготения. Именно в подобных сопоставлениях и кроются открытия.

В те же времена Гевелий прославился своими обширными работами, в частности наблюдениями пятен на Луне и ее либрации. Немного было таких неутомимых наблюдателей. Очень жаль, что он не признавал применение зрительной трубы в сочетании с квадрантом; это изобретение, дав недоступную до тех пор точность наблюдений, сделало большую часть работ Гевелия бесполезными для астрономии.

В ту эпоху астрономия получила новый импульс благодаря созданию научных обществ. Природа так разнообразна в своих творениях и

явлениях, так трудно проникнуть в их причины, что для их познания и для того, чтобы заставить ее раскрыть нам свои законы, нужны объединенные усилия и проницательность большого числа людей. Это объединение становится особенно необходимым, когда научный прогресс умножает количество точек соприкосновения этих причин и уже не позволяет человеку в одиночку углубленно изучать все эти явления; это изучение может получить необходимое развитие только при взаимной помощи многих ученых. Так, физик прибегает к помощи геометра, чтобы постигнуть основные причины наблюдаемых им явлений, а геометр в свою очередь обращается к физику, чтобы сделать полезными свои изыскания, приложив их к опыту, и чтобы этим наметить себе новые пути в математическом анализе. Но главное преимущество академий — это тот философский дух, который должен установиться в них и распространиться на всю нацию и на изучение всех предметов. Одинокий ученый может необдуманно увлечься какой-нибудь системой, о противоречиях которой лишь издалека доходят до него слухи. Но в научном обществе столкновение мнений относительно таких систем быстро заканчивается их разоблачением, и взаимное желание убедить друг друга обязательно приводит его членов к соглашению принимать во внимание только результаты наблюдений и вычислений. Кроме того, опыт уже показал, что со времени организации академий вообще распространилась истинная философия. Академии подают пример проверки всех явлений строгим рассудком, с их появлением исчезли предрассудки, слишком долго царившие в науках и разделявшиеся лучшими умами предшествовавших веков. Их полезное влияние на мнения общества рассеивает заблуждения, принимавшиеся в наши дни с энтузиазмом, который в другие времена увековечил бы их. Одинаково далекие от легковерия, которое готово все принять, и от предубеждений, ведущих к отрицанию всего, что не укладывается в уже составленное мнение, академии всегда мудро ожидают ответов от наблюдений и опытов относительно трудных вопросов и необыкновенных явлений, поощряя исследователей премиями и изданием их работ. Оценивая значение этих работ как по объему и трудности открытия, так и по их непосредственной полезности, и убеждаясь на большом числе примеров, что кажущиеся наиболее бесплодными из них в один прекрасный день могут иметь важные последствия, академии поощряют поиски истины во всех областях, исключая лишь те, которые из-за ограниченности человеческого мышления навсегда будут для него недоступны.* Наконец, из лона академий вышли великие теории, по широте своих обобщений стоящие выше понимания толпы, теории, которые, распространяясь путем многочисленных приложений к природе и к искусствам, стали неистощимым источником знаний и наслаждений. Мудрые правительства, убежденные в пользе научных обществ и рассматривая их как главные основы славы и процветания государств, учредили

* Все здравомыслящие люди вместе с Монтенем должны сказать о недоступных предметах, что «невежество и отсутствие любознательности являются мягким и покойным изголовьем для разумно устроенной головы».

их у себя, чтобы пользоваться светом их знаний, из которого они часто извлекали большую пользу.

Из всех научных обществ самыми знаменитыми числом и важностью своих открытий в астрономии являются Парижская Академия наук и Королевское общество в Лондоне. Первая была основана в 1666 г. Людовиком XIV, который предвидел, какой блеск придадут науки и искусства его царствованию. Этот монарх при достойном содействии Кольбера пригласил многих иностранных ученых переехать в свою столицу. Гюйгенс последовал этому лестному приглашению и в лоне Академии, став одним из первичных ее членов, опубликовал свой замечательный труд «О маятниковых часах».

Благодеяниями Людовика XIV был подобным же образом привлечен в Париж Доминико Кассини. За 40 лет полезных трудов он обогатил астрономию огромным числом открытий: это — теория спутников Юпитера, движения которых он определил по наблюдениям их затмений, открытие четырех спутников Сатурна, вращения Юпитера и Марса, открытие зодиакального света, очень приближающееся к истине определение параллакса Солнца, составление весьма точной таблицы рефракции и, особенно, полная теория либрации Луны. Галилей рассматривал ее либрацию только по широте. Гевелий объяснил либрацию по долготе, приняв, что Луна всегда обращена одной стороной к центру ее орбиты, в одном из фокусов которой находится Земля. В 1675 г. Ньютон в одном письме, обращенном к Меркатору, уточнил объяснение Гевелия, приведя его к простой идее равномерного вращения Луны вокруг самой себя, в то время как она неравномерно обращается вокруг Земли. Но он, так же как и Гевелий, предполагал, что ось вращения Луны всегда перпендикулярна к эклиптике. Кассини же с помощью своих наблюдений выяснил, что эта ось немного наклонена и составляет с эклиптикой постоянный угол и, чтобы удовлетворить уже наблюденному Гевелием условию, по которому все неравенства либрации повторяются с каждым обращением узлов лунной орбиты, он предположил, что узлы лунного экватора постоянно совпадают с этими узлами. Таков был прогресс идей, относящихся к одному из наиболее любопытных явлений системы мира.

Границы этого исторического очерка не позволяют мне рассказать здесь о всех работах большого числа выдающихся академиков-астрономов. Я ограничусь лишь замечанием, что соединение телескопа с квадрантом, изобретение микрометра и гелиометра, открытия, связанные с распространением света, определение размеров Земли и уменьшения тяжести на экваторе также вышли из недр Французской Академии наук.

Астрономия не меньше обязана Королевскому обществу в Лондоне, которое было учреждено несколькими годами раньше Французской Академии наук. Среди астрономов, которых оно взрастило, я назову Флемстида, одного из самых великих когда-либо живших наблюдателей; Галлея, знаменитого своими путешествиями, предпринятыми для обогащения науки, своим прекрасным сочинением, которое позволило ему открыть возвращение кометы 1759 г., и остроумной идеей использовать прохождение Венеры по диску Солнца для определения ее параллакса. Я еще

упомяну Брадлея, образцового наблюдателя, навсегда прославившегося двумя самыми прекрасными открытиями в астрономии — открытием аберрации света неподвижных звезд и нутации земной оси.

Когда сочетание часов с маятником и телескопа с квадрантом сделали ощутимыми для наблюдателей самые малые изменения в положении небесных тел, они стали искать способы определения годичного параллакса звезд. Естественно было думать, что такая большая протяженность, как диаметр земной орбиты, еще заметна на расстоянии этих светил. Старательно наблюдая их во все времена года, астрономы обнаружили очень маленькие изменения положений звезд, иногда совпадающие с эффектом параллакса, но чаще ему противоположные. Чтобы определить закон этих изменений, был необходим инструмент с разделенным с величайшей точностью сектором большого радиуса. Художник, который его сделал, заслуживает свою долю славы в астрономии, обязанной ему своими открытиями. Грэхем, знаменитый английский часовщик, построил большой сектор, с помощью которого Брадлей в 1727 г. обнаружил аберрацию звезд. Для объяснения аберрации этому великому астроному пришла счастливая мысль скомбинировать движение Земли с движением света, которое было выведено Рёмером в конце позапрошлого века из наблюдений затмений спутников Юпитера. Можно удивляться, что в течение половины века, отделяющего это открытие от открытия Брадлея, никто из выдающихся астрономов, живших в то время и допускавших движение света, не обратил внимания на такое простое явление, оказывающее влияние на положение звезд. Но человеческий ум, такой активный в создании разных систем, часто дожидается, пока наблюдения познакомят его с важными истинами, которые могли бы быть открыты простым рассуждением. Так, изобретение телескопов последовало лишь спустя три с лишним века после изобретения увеличительных стекол и все же своим появлением обязано случаю.

В 1745 г. Брадлей определил из наблюдений нутацию земной оси и вывел ее законы. Во всех кажущихся изменениях положений звезд, наблюденных с величайшей точностью, он не обнаружил ничего, что указывало бы на их заметный параллакс. Этому великому астроному мы также должны быть обязаны первым обнаружением главных неравенств движения спутников Юпитера, которые впоследствии более подробно изучил Варгентин. Наконец, Брадлей оставил громадное количество наблюдений всевозможных явлений, которые небо являло в течение более 10 последовательных лет около середины прошлого века. Большое число его наблюдений и точность, которая их отличает, делают его собрание одной из главных основ современной астрономии и определяют эпоху, от которой теперь следует исходить в тонких научных изысканиях. Оно послужило образцом для многих подобных собраний, которые, последовательно совершенствуясь с прогрессом наук, являются вехами, отмечающими периодические и вековые изменения движения небесных светил.

Во Франции в ту же эпоху пользовались известностью Лакайль, а в Германии — Тобиас Майер. Эти неутомимые наблюдатели и трудолюбивые вычислители усовершенствовали астрономические теории и таблицы

и на основании своих наблюдений составили каталоги звезд, которые при сравнении с каталогом Брадлея определяют с большой точностью состояние неба в середине прошлого века.

Измерения длины градуса меридиана и наблюдения маятника, выполненные в разных частях земного шара, — операции, пример проведения которых подала Франция, измерив полную дугу пересекающего ее меридиана и послав академиков на север и на экватор, чтобы и там измерить величину градуса и силу тяжести; измерение дуги меридиана, заключенной между Дюнкерком и островом Форментера, выполненное путем очень точных наблюдений и служащее основой для наиболее естественной и простой системы мер; путешествия, предпринятые для наблюдения двух прохождений Венеры по Солнцу в 1761 и 1769 гг., и довольно точное определение размеров солнечной системы в результате этих путешествий; изобретение ахроматических телескопов, морских хронометров, октанта и повторительного круга, придуманного Майером и усовершенствованного Борда; составление Майером астрономических таблиц, достаточно точных, чтобы служить для определения долгот на море; открытие планеты Уран, сделанное Гершелем в 1781 г., а также ее спутников и двух новых спутников Сатурна, сделанное им же, — вот каковы вместе с открытиями Брадлея главные достижения, которыми астрономия обязана прошлому веку.

Наш нынешний век начался самым счастливым образом для астрономии. Его первый день ознаменовался открытием планеты Цереры, сделанным Пиацци в Палермо, а вскоре за этим открытием последовало открытие еще трех планет — Паллады и Весты — Ольберсом и Юноны — Хардингом.

## Глава V

## ОБ ОТКРЫТИИ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

После того как мы описали, с какими усилиями человеческий ум пришел к открытию законов движения небесных тел, мне остается показать, как он поднялся до основного начала, из которого эти законы вытекают.

Декарт первый попытался свести причину этих движений к механике. Он придумал вихри из неуловимой материи, в центре которых он поместил Солнце и планеты. Вихри планет увлекают их спутников, а солнечный вихрь уносит планеты и спутники с их вихрями. Но движения комет, движущихся в разных направлениях, устранили все эти вихри точно так же, как они уничтожили небесную твердь и всю систему кругов, придуманных древними астрономами. Так, Декарт не оказался удачливее в небесной механике, чем Птолемей в астрономии. Но их работы в этой области вовсе не были бесполезными для науки. Птолемей передал нам прошедшие через четырнадцать веков невежества астрономические истины, найденные древними астрономами и дополненные им самим. Когда явился Декарт, движение, в которое пришли умы после изобретения книгопечатания, открытия Нового Света, создания си-

стемы Коперника, а также религиозных революций, пробудило в них жажду нового. Этот философ, заменивший старые заблуждения более новыми и заманчивыми и поддержанный авторитетом своих работ по геометрии, ниспроверг господство Аристотеля, которое другой, более благоразумный философ едва мог бы пошатнуть. Его «вихри», принятые сперва с энтузиазмом, поскольку они были основаны на движении Земли и планет вокруг Солнца, способствовали признанию этих движений. Но возведя сомнения во всех начинаниях в принцип, Декарт сам предписал подвергнуть его суждения суровому экзамену, и его астрономическая система вскоре была разрушена последующими открытиями, которые, соединившись с его собственными, с открытиями Кеплера и Галилея и с философскими идеями, проникшими тогда во все области, сделали его век, украшенный столькими шедеврами литературы и искусства, наиболее замечательной эпохой истории человеческого разума.

Познакомить нас с общим принципом небесных движений судьбой было предназначено Ньютону. Наградив его величайшей гениальностью, природа позаботилась еще о том, чтобы он жил в самых благоприятных исторических условиях. Декарт преобразовал математические науки плодотворным применением алгебры к теории кривых и к переменным функциям. Ферма заложил основы анализа бесконечно малых своими прекрасными методами максимумов и касательных. Валлис, Рен и Гюйгенс только что нашли законы передачи движения. Учения Галилея о падении тел и Гюйгенса об эволютах и о центробежной силе — все это приводило к теории движения тел по кривым. Кеплер определил те из них, которые описываются планетами, и предугадывал явление всемирного тяготения. Наконец, Гук очень хорошо видел, что движения планет являются результатом начальной силы движения в сочетании с притяжением Солнца. Таким образом, небесная механика для своего полного расцвета ожидала лишь гениального человека, который, сблизив и обобщив эти открытия, сумел бы вывести из них закон тяготения. И Ньютон выполнил это в своем сочинении «Математические начала натуральной философии».

Этот человек, столь знаменитый и имевший столько титулов, родился в Вулсторпе в Англии в конце 1642 г., в год смерти Галилея. Уже первые его математические работы показали, чего он может достигнуть со временем. Беглого чтения учебников ему было достаточно, чтобы понять их содержание. Он прошел геометрию Декарта, оптику Кеплера и арифметику бесконечно малых Валлиса. Вскоре, занявшись новыми открытиями, он, не достигнув еще 27 лет, был уже автором «Исчисления флюксий» и «Теории света». Дорожа своим покоем и опасаясь литературных споров, которых он скорее мог бы избежать, не публикуя свои открытия, он не торопился с их изданием. Доктор Барроу, учеником и другом которого он был, отказался в его пользу от места профессора математики в Кембриджском университете. Именно в то время, когда Ньютон его занимал, он, уступая настояниям Королевского общества в Лондоне и побуждаемый Галлеем, опубликовал свои «Начала». Кембриджский университет, привилегии которого он ревностно отстаивал от нападок короля Якова II, избирал его своим представителем в парла-

мент созыва 1688 и 1701 гг. Королем Вильгельмом он был назначен директором Монетного двора, а королева Анна присвоила ему рыцарское звание. В 1703 г. он был избран президентом Королевского общества и оставался им без перерыва до конца своих дней. Он пользовался самым глубоким уважением в течение всей своей долгой жизни. И после его смерти, наступившей в 1727 г., высшие круги его нации, которой он принес славу, похоронили его с большими почестями.

В 1666 г. Ньютон, удалившись в сельскую местность, стал в первый раз обдумывать систему мира. То обстоятельство, что сила тяжести на вершинах самых высоких гор почти такая же, как на поверхности Земли, навело его на мысль, что она простирается до самой Луны и, складываясь с поступательным движением этого спутника, заставляет его описывать эллиптическую орбиту вокруг Земли. Чтобы проверить это предположение, надо было знать закон уменьшения силы тяжести. Ньютон предположил, что если земная сила тяготения удерживает Луну на ее орбите, планеты также должны удерживаться на орбитах своим тяготением, направленным к Солнцу, и доказал это, исходя из закона площадей, пропорциональных времени; а из постоянства отношения между квадратами времен обращения планет и кубами больших осей их орбит, найденного Кеплером, вытекает, что их центробежная сила и, следовательно, их стремление к Солнцу уменьшаются как квадраты их расстояний до центра этого светила. Ньютон предположил поэтому, что по такому же закону уменьшается и сила тяготения тела по мере его удаления от поверхности Земли.* Исходя из опытов Галилея с падением тяжелых тел, он определил высоту, на которую Луна, предоставленная самой себе, опустилась бы за короткий промежуток времени к Земле. Эта высота равна синусу-верзусу дуги, которую Луна описывает за это же время; этот синус-верзус определяется параллаксом Луны и выражается в долях земного радиуса. Так, чтобы сравнить наблюдение с законом силы тяжести, обратно пропорциональной квадрату расстояния, было необходимо знать величину этого радиуса. Но Ньютон, имея тогда лишь ошибочное измерение земного меридиана, пришел к результату, отличавшемуся от ожидаемого, и, полагая, что еще какие-то неизвестные силы присоединяются к тяготению Луны, отказался от своей идеи. Несколькими годами позже письмо доктора Гука побудило его вновь заняться поиском вида кривой, описываемой брошенным телом, движущимся вокруг центра Земли. В это время Пикар измерил во Франции градус меридиана. Из результатов этого измерения Ньютон узнал, что Луна удерживается на своей орбите одной только силой тяготения, предполагаемой обратно пропорциональной квадрату расстояний. По этому закону он нашел, что траектория, описываемая падающими телами, представляется эллипсом, в фокусе которого находится Земля. Учтя затем результаты наблюдений Кеплера, считавшего, что орбиты

* Среди всех законов, которые предполагают исчезновение притяжения на бесконечном расстоянии, закон природы — единственный, при котором это предположение Ньютона законно.

планет также являются эллипсами, в фокусе которых помещается Солнце, он с удовлетворением увидел, что решение, к которому он пришел, ведомый любопытством, распространяется на величайшие объекты природы. Он изложил множество теорем, относящихся к эллиптическому движению планет; и когда доктор Галлей склонил его опубликовать их, он написал свой труд «Математические начала натуральной философии», который вышел в свет в конце 1687 г.* Эти подробности, взятые нами у Памбертона, современника и друга Ньютона, подтвердившего их своим свидетельством, доказывают, что этот великий геометр еще в 1666 г. нашел основные теоремы о центробежной силе, которые Гюйгенс опубликовал лишь через шесть лет в конце своего сочинения «О маятниковых часах». В самом деле, очень вероятно, что автор метода флюксий [дифференциального исчисления], который, по-видимому, в то время уже владел этим методом, легко открыл эти теоремы.

Ньютон пришел к закону всемирного тяготения с помощью отношения между квадратами времен обращения планет и кубами больших осей их орбит, предполагаемых круговыми. Он показал, что в общем случае это отношение имеет место и для эллиптических орбит и что оно указывает на одинаковую силу притяжения планет к Солнцу, если предположить одинаковыми их расстояния до его центра. Такое же равенство силы тяготения к главной планете существует во всех системах спутников, и Ньютон проверил это на земных телах с помощью очень многочисленных и точных опытов, из которых вытекало, что выделение газов, электричества, теплоты и химические реакции в смеси многих веществ, заключенных в закрытом сосуде, не изменяют вес системы ни во время, ни после смешивания.

Обобщив затем свои изыскания, этот великий геометр показал, что брошенное тело может двигаться по любому коническому сечению под влиянием силы, направленной к его фокусу и обратно пропорциональной квадратам расстояний. Он изучил различные свойства движений по таким кривым, определил условия, необходимые, чтобы такая кривая была окружностью, эллипсом, параболой или гиперболой, условия, зависящие только от скорости и исходного положения тела. Каковы бы ни были скорость, положение и начальное направление движения тела, Ньютон определил коническое сечение, которое может быть им описано и в котором оно, следовательно, должно двигаться. Это является ответом на упрек, высказанный ему Иоганном Бернулли относительно того, что он не показал, что конические сечения — это единственные траектории, которые могут быть описаны телами, побуждаемыми к движению силами, обратно пропорциональными квадрату расстояния. Изыскания Ньютона, приложенные к движению комет, показали, что эти светила движутся вокруг Солнца по тем же законам, что и планеты, с той единственной разницей, что их эллипсы очень сильно вытянуты, причем он дал способ определения элементов этих эллипсов из наблюдений.

* В следующем году были предложены реформы социальной системы, и Ньютон принимал участие в их установлении.

Сравнение величин орбит спутников и продолжительности их обращений с теми же величинами, относящимися к планетам, познакомило его с массами и относительными плотностями Солнца и планет, сопровождаемых спутниками, а также с величинами силы тяжести на их поверхности.

Учитывая, что спутники движутся вокруг своих планет почти так же, как если бы эти планеты были неподвижны, он выяснил, что все эти тела подчиняются той же силе тяготения к Солнцу. Из равенства действия и противодействия он вывел, что Солнце притягивается планетами, а они — своими спутниками, и даже Земля притягивается всеми телами, притягивающимися к ней. Это свойство он затем распространил на все части материи и установил в качестве общего принципа, что *каждая молекула материи притягивает все другие пропорционально своей массе и обратно пропорционально квадрату расстояния до притягиваемой молекулы.*

Этот принцип — не просто гипотеза, которая удовлетворяет явлениям, поддающимся другим объяснениям, как удовлетворяют разными способами уравнениям неопределенной задачи. Здесь задача определена законами, наблюденными в небесных движениях, из которых этот принцип является необходимым следствием. Тяготение планет к Солнцу доказывается законом площадей, пропорциональных времени. Уменьшение тяготения в обратном отношении к квадрату расстояния доказывается эллиптичностью планетных орбит; а закон квадратов времен обращения, пропорциональных кубам больших осей, с очевидностью показывает, что сила тяготения Солнца действовала бы на все планеты, если бы все они были на одинаковом расстоянии от Солнца и, следовательно, их вес был бы, соответственно, пропорционален их массам. Из равенства действия и противодействия следует, что Солнце в свою очередь испытывает притяжение планет, пропорциональное их массам, разделенным на квадраты их расстояний до этого светила. Движения спутников доказывают, что они притягивают одновременно и Солнце, и свои планеты, которые в свою очередь притягивают их. Таким образом, между всеми телами солнечной системы существует взаимное притяжение, пропорциональное массам и обратно пропорциональное квадратам расстояний. Наконец, фигуры планет и эффекты тяжести на поверхности Земли показывают, что это притяжение свойственно не только этим телам, рассматриваемым как целое, но и каждой из составляющих их молекул.

Придя к этому принципу, Ньютон увидел, что из него вытекают важные явления мироздания. Рассматривая силу тяготения на поверхности небесных тел как равнодействующую притяжения всех молекул, он нашел, что это замечательное свойство характерно для закона притяжения, обратно пропорционального квадратам расстояний, так что две сферы, образованные из концентрических слоев переменной плотности, изменяющейся по какому-либо закону, взаимно притягиваются, как если бы их массы были сосредоточены в их центрах. Поэтому тела солнечной системы действуют друг на друга и даже на тела, находящиеся

на их поверхности, почти так же, как действовали бы центры притяжения.

Этот вывод, объясняющий упорядоченность движений тел солнечной системы, позволил этому великому геометру признать в силе, которая удерживает Луну на своей орбите, силу земного тяготения. Он доказал, что вращательное движение Земли должно было сжать ее у полюсов, и определил законы изменения градусов меридиана и распределения силы тяжести на ее поверхности. Он увидел, что притяжение Солнца и Луны порождает и поддерживает наблюдаемые в океане колебания, называемые морскими приливами и отливами. Он понял, что некоторые неравенства Луны и попятное движение ее узлов являются следствием притяжения Солнца. Рассматривая затем вздутие земного сфероида на экваторе как систему спутников, прилегающих к его поверхности, он нашел, что совместное действие Солнца и Луны стремится обратить вспять движение узлов окружностей, которые они описывают вокруг оси Земли, и что все эти стремления, передаваясь на всю массу этой планеты, должны производить в пересечении ее экватора с эклиптикой медленное попятное движение, называемое *прецессией равноденствий.* Итак, причину этого великого явления, зависящего от сжатия Земли и от попятного движения, сообщаемого действием Солнца узлам спутников, два влияния которых Ньютон установил первым, до него нельзя было и заподозрить; даже сам Кеплер, увлеченный своим живым воображением все объяснять гипотезами, был принужден признать бесполезность своих усилий в этом вопросе.

Но, за исключением того, что касается эллиптического движения планет и комет, притяжения сферических тел и отношения масс планет, сопровождаемых спутниками, к массе Солнца, все эти открытия были Ньютоном только намечены. Его теория фигуры планет ограничена предположением об их однородности, его решение проблемы прецессии равноденствий, хотя и очень хитроумное, ошибочно в нескольких отношениях, несмотря на видимое согласие с наблюдениями. Из большого числа возмущений движения небесных тел он рассматривал только возмущения лунного движения, причем самое большое из них, эвекция, выпало из его исследований. Он хорошо обосновал существование открытого им принципа, но развитие вытекающих из него следствий и возможностей было делом последователей этого великого геометра. Несовершенство исчисления бесконечно малых при зарождении этого метода не позволило ему полностью разрешить трудные проблемы, возникающие в теории системы мира, и он часто был вынужден ограничиваться только краткими заметками, всегда ненадежными, пока они не проверены строгим анализом. Несмотря на эти неизбежные недостатки, важность и общность открытий, относящихся к системе мира и к наиболее интересным вопросам математической физики, большое число оригинальных и глубоких мыслей, ставших зародышем многих блестящих теорий геометров прошлого века, — все это, изложенное с большой элегантностью, обеспечивает труду о «Началах» превосходство над другими произведениями человеческого ума.

В науках не так, как в литературе. В ней есть границы, которые гениальный человек может достичь, если он владеет совершенным языком. Его читают с одинаковым интересом во все времена, и его известность не только не ослабляется временем, но еще усиливается бесплодными попытками тех, кто хочет с ним сравниться. Науки, наоборот, не имея пределов, как и природа, возрастают до бесконечности трудами последующих поколений. Самый совершенный труд, поднимая их на высоту, с которой они впредь уже не могут опуститься, порождает новые открытия и подготавливает таким образом новые работы, которые должны его затмить. Другие люди представят под более общим углом зрения и более просто теории, изложенные в книге «Начал», и все истины, которые она раскрыла. Но эта книга навсегда останется памятником глубины гения, открывшего нам самый великий закон вселенной.

Это произведение и не менее оригинальный трактат того же автора по оптике объединяют в себе заслугу открытий с заслугой быть лучшими образцами, которые можно найти в науках и в тонком искусстве производить опыты и подвергать их вычислению. И мы видим в них наиболее удачные применения метода, состоящего в том, чтобы путем ряда индукций подняться от явлений к их причинам, а затем от этих причин перейти ко всем деталям явлений.

Общие законы скрыты во всех частных случаях, где они усложнены таким количеством посторонних обстоятельств, что часто нужно величайшее умение, чтобы их открыть. Надо выбрать наиболее подходящие для данного случая явления или создать их, умножить их число, изменяя сопутствующие им обстоятельства, и наблюдать, что в них имеется общего. Таким способом последовательно восходят ко все более и более широким соотношениям и наконец приходят к общим законам, проверяя их либо путем доказательств или непосредственных опытов, когда это возможно, либо проверкой, удовлетворяют ли они всем известным явлениям.

Таков самый надежный метод, который может руководить нами в поисках истины. Никто из философов не был так верен этому методу, как Ньютон, и никто не располагал в такой степени, как он, счастливой интуицией, которая позволяла ему различать в вещах заключенные в них общие принципы, что присуще истинному гению наук. Эта интуиция позволила ему в падении тел распознать принцип всемирного тяготения. Английские ученые, современники Ньютона, приняли по его примеру метод индукции, ставший основой большого числа великолепных трудов по физике и по анализу. Античные философы, следуя противоположным путем и ставя себя у источника всего, придумывали общие причины для объяснения различных явлений. Их метод, порождавший только бесплодные системы, имел не больше успеха и в руках Декарта. Во времена Ньютона Лейбниц, Мальбранш и другие философы применяли его со столь же малым успехом. Наконец, бесполезность гипотез, которые придумывали с помощью этого метода, и успехи, которыми науки были обязаны методу индукции, привели ученых к этому новому методу, уста-

новленному Бэконом со всей силой здравого смысла и убедительности и еще сильнее зарекомендовавшему себя в открытиях Ньютона.

В эпоху, в которую были сделаны эти открытия, Декарт заменил мистические свойства, приписанные перипатетиками * природе, понятными идеями движения, импульса и центробежной силы. Его остроумная система вихрей, основанная на этих идеях, была с жадностью принята учеными, отвергавшими темные и не имевшие смысла доктрины этой школы; но ученые думали, что во всемирном тяготении возрождаются те мистические свойства, которые были столь справедливо изгнаны французским философом. Только после того, как была распознана неопределенность картезианских объяснений, тяготение было понято и принято в том виде, как его представил Ньютон, т. е. как общий факт, к которому он пришел путем ряда индукций и от которого затем исходил, чтобы объяснить небесные движения. Этот великий человек, несомненно, заслужил бы упрек в восстановлении мистических свойств, если бы он ограничился приложением всемирного тяготения к эллиптическому движению планет и комет, к неравенствам движения Луны, неравенствам земных градусов и силы тяжести, к прецессии равноденствий и морским приливам и отливам, не показав связи своего принципа с этими явлениями. Но геометры, уточняя и обобщая его доказательства и найдя самое полное согласие между наблюдениями и результатами анализа, единодушно приняли его теорию системы мира, с помощью их изысканий ставшую основанием всей астрономии. Эта аналитическая связь отдельных частных фактов с общим фактом и составляет сущность теории. Именно выведя путем точного расчета все явления капиллярности из единственного принципа взаимного притяжения между молекулами материи, которое делается ощутимым только на неуловимых расстояниях, мы можем льстить себя тем, что нашли истинную теорию этого явления. Некоторые ученые, пораженные преимуществами, которые даются предположением о действующем начале, причины которого неизвестны, снова ввели в отдельные отрасли естественных наук таинственные силы и не имеющие смысла объяснения древних философов. Рассматривая философию Ньютона с той же точки зрения, с которой она была отброшена картезианцами, они навязывали ей свои доктрины, которые, однако, с ней не имеют ничего общего в самом главном, а именно, в строгом согласии ее результатов с явлениями.

Ньютон изложил свою теорию системы мира по методу синтеза. Однако представляется, что большинство своих теорем он нашел путем анализа, границы которого он расширил и которому, как он сам подтверждает, он обязан своими основными результатами в исследовании квадратур. Но предпочтение, отдаваемое им синтезу, и высокая оценка Ньютоном геометрии древних заставили его перевести в синтетическую форму свои теоремы и даже свой метод флюксий. И в правилах, и в примерах, которые он дал, мы видим, какое большое значение он этому придавал. Вместе с геометрами его времени можно пожалеть, что

* Перипатетики — последователи философии Аристотеля (Прим. перев.).

он не следовал в изложении своих открытий тому пути, по которому он к ним пришел, и исключил доказательства некоторых выводов, предпочитая удовольствие заставлять своих читателей отгадывать эти доказательства удовольствию их просвещать. Знание метода, которым руководствовался такой гениальный человек, не менее полезно для прогресса науки и даже для его собственной славы, чем его открытия. Этот метод часто составляет их наиболее интересную часть, и если бы Ньютон, вместо простого написания дифференциального уравнения твердого тела наименьшего сопротивления, одновременно представил весь ход своего анализа, он имел бы преимущество дать первое изложение метода вариаций, являющегося одной из самых плодотворных ветвей современного анализа.

Предпочтение, которое этот великий геометр отдавал синтезу, и его пример, возможно, помешали его соотечественникам внести столько, сколько они могли бы, в то развитие астрономии, которое она получила в результате применения математического анализа к принципу всемирного тяготения. Это предпочтение объясняется тем изяществом, с которым он сумел связать свою теорию криволинейных движений с изысканиями древних по коническим сечениям и с прекрасными открытиями, опубликованными Гюйгенсом, следовавшим этому методу. Геометрический синтез имеет свойство никогда не терять из вида свой объект и освещать весь путь, ведущий от первых аксиом к их последним следствиям, в то время как алгебраический анализ скоро заставляет забыть главный предмет [исследований], чтобы заниматься алгебраическими абстрактными операциями, и только в самом конце вновь возвращает нас к этой цели. Но отвлекаясь таким образом от предметов, взяв от них все необходимое, чтобы прийти к искомому результату, мы отдаемся затем аналитическим операциям, собираем все свои силы, чтобы преодолеть возникающие трудности, и приходим, благодаря общности этого метода и неоценимому преимуществу превращать рассуждения в механически выполняемые действия, к результатам, которые часто оказываются недоступными для синтеза. Плодотворность анализа такова, что достаточно перевести на этот универсальный язык частные истины, чтобы получить из их выражений множество новых и неожиданных истин. Никакой язык в такой степени не обладает изяществом, рожденным в результате развития длинного ряда связанных между собой выражений, которые исходят из одной и той же фундаментальной идеи. К преимуществам анализа следует еще отнести возможность всегда приводить решение задачи к самым простым методам. Для этого необходимо только применять его соответствующим образом, удачно подбирая неизвестные и давая окончательному результату вид, наиболее удобный для геометрического построения или численного выражения. Сам Ньютон дает много таких примеров в своей «Универсальной арифметике», а современные геометры, убедившись в этом преимуществе анализа, специально занялись расширением области его применения.*

* Первые приложения анализа к движению Луны являются примером этого преимущества. Они легко дали не только неравенство вариации, которое Ньютон

Тем не менее геометрические представления не следует отбрасывать. Они очень полезны в науках. К тому же любопытно представить себе в пространстве различные результаты анализа и, наоборот, все видоизменения линий и поверхностей и изменения движений тел читать в уравнениях, которые их выражают. Это сближение геометрии и анализа проливает новый свет на эти два направления науки; абстрактные операции анализа делаются наглядными благодаря геометрическим изображениям, их становится легче охватить и интереснее им следовать; и когда наблюдения воплощаются в эти изображения и преобразуют геометрические результаты в законы природы, и когда эти законы, охватывая вселенную, раскрывают перед нашим взором ее прошлые и будущие состояния, вид этого величественного зрелища заставляет нас испытывать самое благородное удовольствие, доступное человеку.

Около 50 лет прошло после открытия притяжения, и к этому открытию не было прибавлено ничего замечательного. Все это время понадобилось для того, чтобы великая истина была широко понята и преодолела противодействие, оказанное принятым на континенте мнением, что тяготение, по примеру Декарта, следует объяснять механически, чтобы истина преодолела различные системы, придуманные по этому поводу, и авторитет нескольких великих геометров, боровшихся с нею, может быть, из самолюбия, но тем не менее ускоривших ее победу своими работами по анализу бесконечно малых. Среди современников Ньютона Гюйгенс сделал больше всех других, чтобы достоинства этого открытия были оценены. Он принял утверждение, что притяжение друг к другу больших небесных тел обратно пропорционально квадратам расстояний, а также все выводы, сделанные из этого Ньютоном относительно эллиптического движения планет, спутников и комет, и силы тяжести на поверхности планет, сопровождаемых спутниками. Он воздал Ньютону в этом отношении все по его заслугам. Но ошибочные идеи о причине силы тяжести заставили его отбросить взаимное притяжение молекул, теории фигуры планет и зависящие от этой фигуры изменения силы тяжести на их поверхности. Однако надо заметить, что закон всемирного тяготения для современников Ньютона, да и для него самого еще не имел той несомненности, которую ему придали успехи математических наук и наблюдений. Эйлер и Клеро, подобно Даламберу, применившие математический анализ к возмущениям небесных движений, первые не считали его достаточно установленным, чтобы различия, найденные ими в наблюдениях и своих расчетах, относившихся к движению Сатурна и лунного перигея, приписать неточностям приближений или вычислений. Но эти три великих геометра и их последователи, проверив расчеты, улучшив методы и продвинув приближения настолько, насколько это было необходимо, по-

---

с трудом получил синтетическим способом, но еще и эвекцию, которую он не связывал с законом тяготения. Конечно, было бы невозможно прийти методом синтеза к многочисленным лунным неравенствам, величины которых, определенные из анализа, представляют наблюдения так же точно, как наши наилучшие таблицы, составленные на основе соединения огромного числа наблюдений с теорией.

средством одного только закона тяготения пришли наконец к объяснению всех явлений системы мира и довели теорию и астрономические таблицы до точности, превзошедшей ожидаемую. Не прошло еще и трех веков, как Коперник ввел в эти таблицы движение Земли и других планет вокруг Солнца. Около века спустя Кеплер ввел в них законы эллиптического движения, зависящие только от солнечного притяжения. Теперь они включают множество неравенств, рожденных из взаимного притяжения тел планетной системы; весь эмпиризм из них изгнан, а из наблюдений в них использованы только необходимые величины.

Вся мощь анализа проявляется главным образом в этих его применениях. Это чудесный инструмент, без которого было бы невозможно проникнуть в столь сложный по своим проявлениям механизм, причина которого так проста. Геометр в своих формулах охватывает теперь всю совокупность солнечной системы и ее последовательные изменения. Он возвращается к различным состояниям этой системы в самые отдаленные времена и переходит к ее состояниям, которые откроют наблюдателям грядущие века. Он видит, как эти большие изменения, полное развитие которых требует миллионов лет, возобновляются за немногие столетия в системе спутников Юпитера благодаря быстроте их обращений и производят необычные явления, предвиденные астрономами, но слишком сложные или слишком медленные, чтобы они могли определить их законы. Теория тяготения, благодаря стольким приложениям ставшая средством таких же надежных открытий, как сами наблюдения, познакомила нас с этими законами и со многими другими, из которых наиболее замечательные — это большие неравенства Юпитера и Сатурна, вековые уравнения движения Луны относительно Солнца, своих узлов и перигея и замечательное отношение, существующее между движениями трех первых спутников Юпитера.

При помощи этого средства геометр смог извлечь из наблюдений, как из неисчерпаемого рудника, наиболее важные элементы астрономии, которые без анализа оставались бы навечно скрытыми. Он определил относительные значения масс Солнца, планет и спутников по обращениям этих светил и по развитию их периодических и вековых неравенств. Скорость света и эллиптичность Юпитера были даны ему затмениями спутников Юпитера с большей точностью, чем непосредственными наблюдениями. Он вывел вращение Урана и Сатурна с его кольцом, а также сжатие этих двух планет из взаимных положений орбит их спутников. Параллаксы Солнца и Луны и сама эллиптичность земного сфероида проявились в лунных неравенствах, потому что Луна своим движением выявляет усовершенствованной астрономии сжатие Земли, с шаровидностью которой она познакомила первых астрономов своими затмениями. Наконец, благодаря счастливому сочетанию анализа с наблюдениями, Луна, которая, казалось, была придана Земле, чтобы освещать ее ночью, стала еще самым надежным лоцманом мореплавателя, оберегая его от опасностей, которым он долгое время подвергался из-за ошибок в вычислении своего места положения. Совершенство лунной теории, которому моряки обязаны этим ценным преимуществом и возможностью с точностью опре-

делять положение места, где они пристали к берегу, есть результат полувековой работы геометров. За этот короткий промежуток времени география, обогащенная применением лунных таблиц и морских часов, сделала больше успехов, чем за все предыдущие века. Эти величественные теории объединяют в себе все, что может дать цену открытиям: величие и практическую пользу предмета, плодотворность результатов и заслугу преодоления трудностей.

Чтобы этого достичь, понадобилось одновременно усовершенствовать механику, оптику, наблюдения и анализ, которые в основном обязаны своим быстрым ростом потребностям небесной физики. Ее можно будет сделать еще более точной и простой, но последующие поколения увидят с благодарностью, что современные геометры не передали им ни одного астрономического явления, у которого они не определили бы законы и причины. Надо отдать Франции должное и справедливо отметить, что если Англии досталась честь открыть всемирное тяготение, то главным образом французским геометрам и работам, получившим премии Французской Академии наук, мы обязаны многочисленными применениями этого открытия и революцией, которую оно произвело в астрономии.*

Не одно только притяжение, регулирующее движение и фигуру небесных тел, существует между их молекулами. Они подчинены еще притягивающим силам, от которых зависит внутреннее строение тел и которые проявляются только на неощутимых для наших чувств расстояниях. Ньютон первый дал пример вычисления сил такого рода, доказав, что при прохождении света из одной прозрачной среды в другую притяжение сред преломляет его так, что отношение синусов углов преломления и падения всегда постоянно; это уже было известно из опыта. В своем трактате по оптике великий физик из таких сил вывел сцепление, сродство, известные тогда химические явления и явления капиллярности. Этим он установил истинные начала химии, всеобщее признание которых запоздало еще больше, чем признание всемирного тяготения. Однако он все же дал несовершенное объяснение явлений капиллярности, и их полная теория стала делом его последователей.

Является ли принцип всемирного тяготения первичным законом природы или это лишь общее проявление неизвестной причины? Нельзя ли к этому принципу привести явление сродства? Ньютон, более осторожный, чем некоторые из его учеников, не высказывался по этим вопросам,

* История астрономии должна с благодарностью упомянуть имя одного сановника из числа своих самых лучших покровителей. В 1714 г. господин Руйе де Меле, советник парижского парламента, завещал Академии наук значительную денежную сумму, чтобы основать две ежегодные премии за усовершенствование астрономических теорий и способов определения долготы на море. Эти премии и были присуждены наиболее выдающимся иностранным геометрам. Глубокие изыскания, содержащиеся в их работах, награжденных Академией, полностью удовлетворили пожеланиям основателя этих премий. Один второстепенный способ получения долготы на море, который господин Руйе де Меле представил с оговоркой в своем завещании, послужил предлогом для его наследников, чтобы это завещание опротестовать. Академия наук выступила в защиту завещания, и весьма счастливо для астрономии и географии процесс был решен в ее пользу.

на которые наше незнание глубинных свойств материи не позволяет дать удовлетворительные ответы. Вместо того чтобы строить гипотезы, ограничимся лишь некоторыми размышлениями об этом принципе и о том, как он был использован геометрами.

Из равенства действия противодействию Ньютон заключил, что каждая молекула небесного тела должна притягивать его так же, как она притягивается им сама, и что, таким образом, сила тяжести есть равнодействующая притяжения всех молекул притягивающего тела. Принцип действия, равного противодействию, встречается с некоторыми затруднениями, когда способ действия сил неизвестен. Уже Гюйгенс, сделавший этот принцип основанием своих изысканий о соударении упругих тел, нашел, что он недостаточен, чтобы установить взаимное притяжение молекул. Следовательно, было необходимо подтвердить это притяжение путем наблюдений, чтобы не оставалось никаких сомнений по этому очень важному для ньютоновой теории вопросу. Небесные явления можно разделить на три класса. Первый из них охватывает все явления, зависящие только от стремления центров небесных тел друг к другу. Таковы эллиптические движения планет и спутников и их взаимные возмущения, независимые от их фигур. Ко второму классу я отношу явления, которые зависят от стремления молекул притягиваемых тел к центрам притягивающих тел. Таковы морские приливы и отливы, прецессия равноденствий и либрация Луны. Наконец, к третьему классу мною отнесены явления, зависящие от действия молекул притягивающих тел на центры притягиваемых и на свои собственные молекулы. Два лунных неравенства, вызванных сжатием Земли, и изменения силы тяжести на ее поверхности, движения орбит спутников Юпитера и Сатурна, фигура Земли относятся к явлениям такого рода. Геометры, которые для объяснения силы тяжести окружали вихрем каждое небесное тело, могли допускать ньютоновы теории применительно к явлениям первых двух классов. Но они были вынуждены отвергнуть, как это сделал Гюйгенс, теории явлений, относящихся к третьему классу и основанных на взаимном притяжении молекул притягивающих тел. Совершенное согласие этих теорий со всеми наблюдениями теперь не должно оставлять ни малейшего сомнения относительно взаимного притяжения молекул. Закон взаимного притяжения, обратно пропорционального квадрату расстояния, — это закон эманаций, исходящих из центра. Он представляется законом всех сил, влияние которых проявляется на заметных расстояниях, как это было обнаружено в случае электрических и магнитных сил. Таким образом, этот закон, в точности удовлетворяя всем явлениям, в силу своей простоты и всеобщности должен рассматриваться как точный. Одно из его замечательных свойств состоит в том, что если бы размеры всех тел вселенной, их взаимные расстояния и их скорости пропорционально увеличились или уменьшились, то эти тела описывали бы кривые, в точности подобные тем, которые они описывают, так что вселенная, уменьшенная таким способом до самого маленького пространства, которое можно вообразить, представляла бы наблюдателям всегда такие же видимые явления. Следовательно, эти явления не зави-

сят от размеров вселенной, так же как вследствие закона пропорциональности силы и скорости они независимы от абсолютного движения, которое вселенная может иметь в пространстве. Поэтому простота законов природы [47] позволяет нам наблюдать и знать только их отношения.*

Закон притяжения дает небесным телам свойство притягиваться почти в точности так же, как если бы их массы были сосредоточены в их центрах тяжести. Кроме того, он придает их поверхностям и орбитам, которые они описывают, эллиптическую форму, самую простую после сферической и круговой, которые древние полагали присущими светилам и их движениям.

Мгновенно ли передается притяжение от одного тела к другому? Продолжительность его передачи, если бы она была для нас ощутима, обнаружилась бы главным образом в вековом ускорении движения Луны. Я предполагал таким способом объяснить наблюдаемое ускорение этого движения и нашел, что удовлетворить наблюдениям можно, лишь приписав силам притяжения скорость, в 7 000 000 раз большую скорости светового луча. Так как причина векового уравнения Луны в настоящее время хорошо известна, мы можем утверждать, что тяготение передается, по крайней мере, в 50 000 000 раз быстрее света. Поэтому, не боясь внести заметную ошибку, можно считать его распространение мгновенным.

Притяжение может еще породить и беспрерывно поддерживать движение в системе тел, бывших изначально неподвижными, так как неправильно было бы сказать, подобно некоторым философам, что со временем оно должно объединить их всех в их общем центре тяжести. Единственные элементы, которые должны всегда оставаться равными нулю, это движения этого центра и сумма площадей, описанных вокруг него за некоторое время всеми молекулами системы, спроектированными на какую-либо плоскость.

## Глава VI

## РАЗМЫШЛЕНИЯ О СИСТЕМЕ МИРА И О БУДУЩИХ УСПЕХАХ АСТРОНОМИИ

Очерк по истории астрономии, который мы дали, представляет три хорошо различимых периода, которые, относясь к явлениям, к законам, управляющим ими, и к силам, от коих эти законы зависят,

* Попытки геометров доказать постулат Евклида о параллельных прямых до сих пор оказались безрезультатными. Однако никто не отменил этот постулат и выведенные Евклидом из него теоремы. Восприятие протяженности поэтому включает особое свойство, очевидное само по себе, без которого нельзя точно установить свойства параллельных прямых. Идея ограниченной протяженности, например идея круга, не содержит ничего, что зависело бы от его абсолютной величины. Но если мысленно уменьшить его радиус, мы будем вынуждены уменьшить в таком же отношении его окружность и стороны всех вписанных в него фигур. Эта пропорциональность, как мне кажется, есть постулат, гораздо более естественный, чем постулат Евклида. Любопытно обнаружить его в выводах из принципа всемирного тяготения.

показывают нам путь этой науки, которым она следовала в своем развитии и которым другие естественные науки должны следовать по ее примеру. Первый период охватывает наблюдения видимых движений небесных тел, сделанные астрономами до Коперника, и гипотезы, придуманные ими, чтобы объяснить эти движения и подвергнуть их вычислениям. Второй период характерен тем, что Коперник выводит из этих видимых движений вращение Земли вокруг себя и вокруг Солнца и Кеплер открывает законы планетных движений. Наконец, третий период знаменуется тем, что Ньютон, опираясь на эти законы, поднимается до принципа всемирного тяготения, и геометры, прилагая к этому принципу математический анализ, выводят из него все астрономические явления и многочисленные неравенства движений планет, спутников и комет. Таким образом, астрономия свелась к решению великой проблемы механики, для которой элементы небесных движений являются произвольными постоянными. Она обладает всей достоверностью, вытекающей из огромного количества и разнообразия строго объясненных явлений и из простоты принципа, которого одного достаточно для их объяснения. Не опасаясь, что появление нового светила опровергнет этот принцип, можно заранее утверждать, что движение этого светила будет с ним в согласии. Мы уже видели это на примере Урана и четырех недавно открытых телескопических планет. Каждое появление кометы также дает этому новое подтверждение.[48]

Таково, без всякого сомнения, строение солнечной системы. Огромный солнечный шар, главный фокус различных движений в этой системе, вращается вокруг самого себя за $25^1/_2$ суток; его поверхность покрыта океаном светящейся материи. Вне его пределов планеты со своими спутниками движутся по почти круговым орбитам в плоскостях, мало наклоненных к солнечному экватору. Бесчисленные кометы после приближения к Солнцу удаляются на расстояния, доказывающие, что его царство простирается гораздо дальше, чем известные нам пределы планетной системы. Это светило не только действует своим притяжением на все эти шары, заставляя их двигаться вокруг себя, но и распространяет на них свой свет и тепло. Его благотворное влияние способствует появлению животных и растений, покрывающих Землю. Аналогия приводит нас к мысли, что оно производит такое же действие на другие планеты, так как естественно думать, что материя, разнообразие которой мы видим проявляющимся столькими видами, не бесплодна на такой большой планете как Юпитер, который, как и земной шар, имеет свои дни и ночи, свои годы и на котором наблюдения отмечают изменения, указывающие на наличие очень активных сил. Человек, живущий при определенной температуре на Земле, по всей видимости, не смог бы жить на других планетах. Но не должно ли существовать бесконечное множество организмов, способных пребывать при разных температурах, господствующих на других шарах этой вселенной? Если одно только различие стихий и климатов создает столько разнообразия в творениях Земли, то насколько больше должны различаться организмы разных планет и их спутников? Самое живое воображение не может составить себе об этом никакого

представления. Но их существование, по меньшей мере, весьма вероятно.

Хотя элементы планетной системы произвольны, между собой они имеют такие соотношения, которые могут просветить нас относительно их происхождения. Рассматривая этот вопрос с особым вниманием, нельзя не удивляться, видя, что все планеты движутся вокруг Солнца с запада на восток и почти в одной и той же плоскости, а спутники движутся вокруг своих планет в таком же направлении и почти в той же плоскости, что и планеты. Наконец, Солнце, планеты и спутники, у которых наблюдается вращательное движение, вертятся вокруг самих себя в направлении своего поступательного движения и почти в его же плоскости. Спутники в этом отношении представляют замечательную особенность. Их вращательное движение в точности равно движению их обращения, так что они неизменно обращены к самой планете одним и тем же полушарием. Во всяком случае это наблюдается у Луны, четырех спутников Юпитера и у последнего спутника Сатурна, т. е. у тех спутников, у которых до сих пор открыто вращение.

Эти столь чрезвычайные явления не вызваны неупорядоченными причинами. Вычислив их вероятность, находим, что свыше 200 000 000 000 против 1 за то, что эти явления не случайны. Эта вероятность намного больше вероятности большинства исторических явлений, в которых мы не сомневаемся. Поэтому мы должны, по крайней мере с той же степенью уверенности, полагать, что некая первопричина направляет движение планет.

Другое столь же замечательное явление в солнечной системе — это малая эксцентричность орбит планет и спутников, тогда как орбиты комет очень вытянуты, причем орбиты в этой системе не имеют промежуточных стадий между большим эксцентриситетом и малым. Здесь тоже мы вынуждены видеть влияние направляющей причины. Случай не мог бы дать всем планетным орбитам почти круговую форму. Следовательно, необходимо, чтобы причина, определившая движения этих планет, сделала их почти круговыми. Кроме того, необходимо, чтобы большой эксцентриситет орбит комет и направление их движения во все стороны тоже были ее обязательными следствиями, потому что, рассматривая орбиты комет с обратными движениями как орбиты, наклоненные к эклиптике на угол, больший $100^g$ [90°], мы находим, что средняя наклонность орбит всех наблюденных комет близко приближается к $100^g$ [90°], как это должно быть, если эти тела были пущены случайным образом.

Какова эта первоначальная причина? В примечании, завершающем эту работу, я изложу одну гипотезу, которая, как мне кажется, весьма правдоподобно вытекает из упомянутых выше явлений; но я представляю ее с сомнением, которое должно вызывать все, что не является результатом наблюдения и вычисления.

Какова бы ни была действительная причина, несомненно, что элементы планетной системы упорядочены таким образом, чтобы обладать наибольшей устойчивостью, если посторонние причины ее не нарушают. Из-за того только, что движения планет и спутников почти круговые,

имеют одинаковые направления и происходят в мало различающихся плоскостях, эта система колеблется лишь около некоторого среднего состояния, отклоняясь от него на очень малые величины. Средние движения вращения и обращения этих тел неизменны, и их средние расстояния от фокусов их главных движущих сил постоянны. Все вековые неравенства периодичны. Наиболее значительные из них те, которые действуют на движение Луны по отношению к ее перигею, ее узлам и к Солнцу. Они достигают нескольких окружностей. Но после очень большого числа веков периоды повторяются. В этом длинном интервале времени все части лунной поверхности последовательно обращались бы к Земле, если бы не было притяжения земного сфероида, которое, заставляя вращение Луны участвовать в этих больших неравенствах, непрерывно поворачивает к нам одно и то же полушарие этого спутника и делает другое его полушарие вечно невидимым. Таким же образом взаимное притяжение трех первых спутников Юпитера с самого начала установило и поддерживает наблюдаемое соотношение между их средними движениями, состоящее в том, что сумма средней долготы первого спутника с удвоенной долготой третьего без утроенной долготы второго постоянно равна двум прямым углам. Благодаря небесным притяжениям продолжительность года на каждой планете всегда почти одинакова. Изменения наклона ее орбиты к ее экватору, заключенные в узких пределах, могут внести лишь незначительные изменения в температуру времен года. Кажется, что природа все расположила на небе так, чтобы обеспечить длительное существование планетной системы, подобно тому, как она так великолепно это сделала на Земле, чтобы сохранить живые существа и увековечить виды.

Устойчивость этих систем обусловливается главным образом притяжением больших тел, расположенных в центре планетной системы и систем спутников, взаимное действие которых, как и притяжение посторонних тел, непрерывно стремится ее нарушить. Если бы действие Юпитера прекратилось, его спутники, которых мы видим обращающимися вокруг него в удивительном порядке, сразу же рассеялись бы, одни описывая вокруг Солнца очень вытянутые эллипсы, а другие бесконечно удаляясь по гиперболическим орбитам. Таким образом, внимательное рассмотрение солнечной системы показывает нам необходимость существования центральной, очень мощной силы, чтобы поддерживать целостность системы и упорядоченность ее движений.

Одни эти соображения объяснили бы расположение тел солнечной системы, если бы геометр не должен был смотреть дальше и искать в первичных законах природы причину явлений, в наибольшей степени отмеченных мировой упорядоченностью. Некоторые из них уже приведены к этим законам. Так, устойчивое положение полюсов Земли на ее поверхности и устойчивое равновесие морей, столь необходимые для сохранения организованных существ, являются лишь простым следствием вращательного движения и всемирного тяготения. Своим вращением Земля была сжата у полюсов, и ее ось вращения стала одной из ее главных осей, что делает неизменным и климат и продолжительность суток.

Вследствие силы тяжести наиболее плотные земные слои приблизились к центру Земли, средняя плотность которой, таким образом, превышает плотность покрывающих ее вод. Этого достаточно, чтобы обеспечить устойчивость равновесия морей и обуздать ярость волн. Эти явления и некоторые другие, объясняемые подобным же образом, позволяют думать, что все они вследствие более или менее скрытых отношений зависят от этих законов, но что лучше сознаться в их незнании, чем подменять их вымышленными причинами исключительно для того, чтобы успокоить нашу озабоченность истоками интересующих нас вещей.

Я не могу не отметить здесь, насколько Ньютон отклонился в этом случае от метода, который он вообще так удачно применял. После опубликования своих работ о системе мира и о свете этот великий геометр, отдавшись умозрениям другого рода, исследовал, на каких основаниях создатель природы дал солнечной системе именно такое устройство, о котором мы говорили. Изложив в примечании, завершающем его трактат о «Началах»,* удивительное явление движения планет и спутников в одном направлении, приблизительно в одной плоскости и по почти круговым орбитам, он прибавляет: «Все эти, столь упорядоченные движения не имеют механической причины, потому что кометы движутся во всех частях неба и по очень эксцентрическим орбитам... Это удивительное размещение Солнца, планет и комет может быть только творением разумного и всемогущего существа». В конце своей «Оптики» он повторяет эту же мысль, в которой он еще больше утвердился, если бы знал то, что мы показали, а именно, что расположение планет и спутников как раз таково, чтобы обеспечивать их устойчивость. Он сказал: «Слепой случай никогда не смог бы заставить двигаться таким образом все планеты; исключение составляют несколько едва уловимых неравенств, которые могут происходить от взаимодействия планет и комет и которые, вероятно, с течением времени сделаются больше, пока наконец не станет необходимым, чтобы творец этой системы снова привел ее в порядок». Но разве это расположение планет не может быть само результатом законов движения, и высший разум, вмешательство которого предполагает Ньютон, разве не мог бы сделать его зависящим от более общего явления? Таковым, по нашим предположениям, может быть туманная материя, рассеянная в различных скоплениях в необъятности небес. Кроме того, можно ли еще утверждать, что сохранение планетной системы входит в намерения творца природы? Взаимное притяжение тел этой системы не может нарушить ее устойчивость, как это предполагает Ньютон. Но не было ли в небесном пространстве другого флюида, кроме света, такого, чтобы сопротивление этого флюида и уменьшение массы Солнца, вызванное его излучением, нарушили бы с течением времени расположение планет, и тогда для его поддержания, несомненно, потребовалась бы реформа. Но столько вымерших видов животных, строение кото-

* Это примечание отсутствует в первом издании его работы. Представляется, что Ньютон до тех пор занимался исключительно математическими науками, которые он, к несчастью для них и для своей славы, слишком рано оставил.

рых г-н Кювье смог с редкой проницательностью распознать в многочисленных ископаемых костях, которые он описал, не указывают ли они на имеющуюся у природы тенденцию изменять даже самые неизменные на вид вещи? Величина и значение солнечной системы не должны исключать ее из этого общего закона, так как они таковы только относительно нашего ничтожества, а эта система, кажущаяся нам столь огромной, является лишь незаметной точкой во вселенной. Взглянув на историю развития человеческого разума и его заблуждений, мы увидим, что окончательные причины сохранения планетной системы постоянно отодвигаются к пределам его знаний. Эти причины, перенесенные Ньютоном к границам солнечной системы, в его времена относили к атмосфере, чтобы объяснить метеоры. Поэтому в глазах философа они являются лишь следствием нашего теперешнего незнания истинных причин.

В споре с Ньютоном об изобретении исчисления бесконечно малых Лейбниц живо критиковал посредничество божества для восстановления порядка в солнечной системе. Он сказал: «Это значит иметь очень узкое представление о мудрости и всемогуществе бога». Ньютон ответил такой же резкой критикой предустановленной гармонии Лейбница, которую он назвал нескончаемым чудом. Потомки не приняли этих бесполезных гипотез, но отдали полную справедливость математическим работам этих двух величайших гениев. Открытие всемирного тяготения и усилия его автора связать с ним небесные явления навсегда будут предметом восхищения и благодарности.

Обратим теперь наши взоры за пределы солнечной системы, на бесчисленные солнца, рассеянные в безграничности пространства на таком удалении от нас, что диаметр земной орбиты, наблюдаемой из их центров, был бы незаметен. Некоторые звезды испытывают периодические изменения цвета и яркости, которые указывают, что на поверхности этих светил существуют большие пятна, которые вращательное движение попеременно то являет нашим взорам, то скрывает от них. Другие звезды появляются неожиданно и затем исчезают после нескольких месяцев яркого сияния. Такова была звезда, наблюденная Тихо Браге в 1572 г. в созвездии Кассиопеи. За очень короткое время она превзошла по яркости самые яркие звезды и даже Юпитер. Ее было видно среди бела дня. Затем ее свет стал ослабевать, и она исчезла через 16 месяцев после ее открытия. Ее цвет испытал значительные изменения: вначале она была ослепительно белой, потом красновато-желтой и наконец свинцово-белой, как Сатурн. Какие колоссальные изменения должны были произойти в этом огромном теле, чтобы оказаться такими заметными на расстоянии, которое нас от него отделяет! Насколько они должны превышать изменения, наблюдаемые на поверхности Солнца, и как убеждают нас, что природа далеко не всегда и не везде одинакова! Все эти светила, ставшие невидимыми, не изменяли своих положений за время их появлений. Следовательно, в небесном пространстве существуют темные тела, такие же большие и, быть может, в таком же большом числе, как и звезды.

Можно думать, что звезды не рассеяны на приблизительно одинако-

вых расстояниях от нас, а собраны в различные группы; некоторые из них включают миллиарды этих светил. Наше Солнце и наиболее яркие звезды, вероятно, составляют часть одной из этих групп, которая из точки, где мы находимся, представляется нам окружающей небо и образующей Млечный путь. Огромное число звезд, видимых одновременно в поле зрения сильного телескопа, направленного на Млечный путь, доказывает нам его громадную глубину, в тысячу раз превышающую расстояние от Сириуса до Земли. Таким образом, очень вероятно, что свет, излученный большинством этих звезд, затратил многие века, чтобы дойти до нас. Млечный путь представился бы бесконечно удалившемуся наблюдателю в виде сплошного белого свечения небольшого диаметра, так как иррадиация, которая присутствует даже в самых лучших телескопах, перекрыла бы промежутки между звездами. Поэтому очень вероятно, что среди туманностей некоторые представляют собой группы из огромного числа звезд; если рассматривать эти группы изнутри, они покажутся похожими на Млечный путь. Если подумать теперь об этом изобилии звезд и туманностей, рассеянных в небесном пространстве и об огромных расстояниях, которые их разделяют, изумленное воображение будет в затруднении постичь его границы.[49]

Гершель, наблюдая туманности в свои мощные телескопы, проследил процесс их сгущения не по одной туманности, поскольку этот процесс может стать заметным для нас только через века, а по их совокупности, как в огромном лесу прослеживают рост деревьев по имеющимся в нем экземплярам разных возрастов. Вначале он наблюдал туманную материю, рассеянную в различных скоплениях в разных частях неба, где она занимает значительное пространство. В некоторых из этих скоплений он увидел, что материя слегка сгущается вокруг одного или нескольких слабо блестящих ядер. В других туманностях эти ядра по отношению к окружающей их туманности блестели сильнее. Атмосферы каждого ядра разделялись путем дальнейшего сгущения и получались множественные туманности, образованные из блестящих, очень близких друг к другу ядер, окруженных каждое своей атмосферой. Иногда туманная материя, конденсируясь равномерно, образует так называемые *планетарные туманности*. Наконец, еще большая степень конденсации превращает все эти туманности в звезды. Распределение туманностей в соответствии с этими научными воззрениями с большим правдоподобием указывает на их будущее превращение в звезды и на прежнее состояние ныне существующих звезд в виде туманностей. Так, основываясь на явлении прогрессирующего сгущения туманной материи, мы приходим к представлению о том, что Солнце некогда было окружено обширной атмосферой; к этому представлению, как это будет видно из последнего примечания, я пришел путем изучения явлений в солнечной системе. Такое замечательное совпадение выводов, полученных противоположными путями, придает большую вероятность предположению, что прежнее состояние Солнца было именно таким.

Связывая образование комет с образованием туманностей, можно рассматривать их как маленькие туманности, блуждающие от одной сол-

нечной системы к другой и образованные путем сгущения туманной материи, столь обильно рассеянной во вселенной. Таким образом, кометы по отношению к нашей системе были бы подобны аэролитам по отношению к нашей Земле, для которой они, мне кажется, являются посторонними телами. Когда эти кометы делаются видимыми для нас, они так похожи на туманности, что их часто путают с ними, и только по их движению или по точно известным туманностям, находившимся в том участке неба, где они появились, удается их отличить. Это предположение удачно объясняет расширение голов и хвостов комет по мере их приближения к Солнцу, исключительную разреженность этих хвостов, которые, несмотря на их огромную глубину, не ослабляют заметным образом яркость видимых через них звезд, движение комет во всех направлениях и большой эксцентриситет их орбит.

Из предшествовавших рассуждений, основанных на телескопических наблюдениях, вытекает, что движение солнечной системы очень сложно. Луна описывает почти круговую орбиту вокруг Земли. Но, наблюдаемая с Солнца, она казалась бы описывающей ряд эпициклоид, центры которых находятся на окружности земной орбиты. Подобным же образом Земля описывает ряд эпициклоид, центры которых располагаются на кривой, описываемой Солнцем вокруг центра тяжести группы звезд, к которой оно принадлежит. Наконец, Солнце само также описывает ряд эпициклоид, центры которых находятся на кривой, описываемой центром тяжести этой группы вокруг центра тяжести вселенной. Астрономия уже сделала большой шаг вперед, раскрыв нам движение Земли и эпициклоиды, описываемые Луной и спутниками на орбитах своих планет. Но если потребовались века, чтобы узнать движения планетной системы, какое огромное время потребуется, чтобы определить движение Солнца и звезд! Наблюдения уже показывают нам эти движения. Их совокупность, как кажется, указывает на общее движение всех тел солнечной системы к созвездию Геркулеса.* Но в то же время они как будто показывают, что видимые движения звезд являются сочетанием их собственных движений с движением Солнца. Кроме того, замечаются очень странные движения в двойных звездах. Так называют звезды, которые в телескоп видны как состоящие из двух, очень близко расположенных звезд. Эти две звезды вращаются одна вокруг другой таким образом, что из наблюдений, выполненных за небольшое число лет, для некоторых из них оказалось возможным определить приближенные периоды их обращения.

Все эти движения звезд, их параллаксы, периодические изменения света переменных звезд и продолжительности их вращения, каталог только что появившихся звезд и их положение в момент преходящей вспышки, наконец, последовательные изменения формы туманностей, уже заметные у некоторых из них, особенно у великолепной туманности Ориона, — вот какими будут главные объекты будущей астрономии относительно звезд.

---

* См. комментарий 45 (Прим. ред.).

Ее успехи зависят от трех условий: от измерения времени, измерения углов и от совершенства оптических инструментов. Первые два в настоящее время не оставляют желать почти ничего лучшего. Поэтому поощрительные меры должны быть направлены в основном на развитие третьего условия, так как несомненно, что если удастся построить ахроматические телескопы с очень большими отверстиями, они позволят открыть в небесах явления, которые до сих пор были невидимы, особенно если позаботиться перенести эти телескопы в чистую и разреженную атмосферу высоких гор на экваторе.

Остается еще сделать множество открытий в нашей собственной системе. Недавно открытые планета Уран и ее спутники дают основание предположить существование до сих пор еще не наблюдавшихся планет. Было даже подозрение, что одна из них должна находиться между Марсом и Юпитером, чтобы удовлетворить двойной прогрессии, которая приблизительно соблюдается в интервалах между планетными орбитами, начиная с Меркурия. Это подозрение подтвердилось открытием четырех малых планет, расположенных на расстояниях от Солнца, мало отличающихся от того, которое эта прогрессия дает для промежуточной планеты между Юпитером и Марсом. Действие Юпитера на эти планеты, усугубленное большой величиной эксцентрисистетов и наклонностей их переплетающихся орбит, производит в их движениях значительные неравенства, которые прольют новый свет на теорию небесных притяжений и позволят еще улучшить ее.

Произвольные элементы этой теории и сходимость ее приближений зависят от точности наблюдений и от успехов анализа. Поэтому с каждым днем она должна становиться все более точной. Большие вековые неравенства небесных тел, возникающие от их взаимных притяжений и уже обнаруженные наблюдениями, с течением веков получат свое развитие. Наблюдения спутников, сделанные с помощью мощных телескопов, улучшат теории их движения и, может быть, приведут к открытию новых спутников. Путем точных и многочисленных измерений будут определены все неправильности фигуры Земли и силы тяжести на ее поверхности, и скоро вся Европа покроется сетью треугольников, которые позволят точно определить положение, кривизну и размеры всех ее частей. Явления морских приливов и отливов и их особенности в разных портах обоих полушарий будут определены из длинных рядов наблюдений и сравнены с теорией силы тяжести. Мы узнаем, нарушается ли заметным образом вращение и обращение Земли из-за изменений, испытываемых ее поверхностью, и ее соударений с аэролитами, которые, по всей вероятности, приходят из глубин небесного пространства. Новые кометы, которые появятся, наблюдение тех, которые, двигаясь по гиперболическим орбитам, блуждают от одной системы к другой, возвращения комет, имеющих эллиптические орбиты, и изменения их формы и интенсивности света, которые будут наблюдаться при каждом появлении, возмущения, вносимые всеми этими светилами в планетные движения и испытываемые ими самими, а также те возмущения комет, которые при приближении к большой планете могут полностью изменить свои

орбиты, наконец, изменения в движениях и орбитах планет и спутников, вызванные влиянием звезд и, может быть, еще сопротивлением эфирной среды, — вот главные вопросы, которые предлагаются будущим астрономам и геометрам для исследования солнечной системы.

Астрономия по величию своего объекта и по совершенству своих теорий является самым прекрасным памятником человеческого духа и проявлением самого высокого его интеллекта. Обольщенный обманом чувств и самолюбием человек долгое время считал себя центром движений светил, и его суетная гордыня была наказана страхами, которые эти светила в нем вызывали. Наконец, многие века труда сорвали завесу, скрывавшую от его глаз систему мира. И тогда он увидел себя на планете, почти не заметной в солнечной системе, огромная протяженность которой является лишь ничтожной точкой в необъятности вселенной. Величественные выводы, к которым привело его это открытие, вполне могут утешить его за то положение, которое отведено Земле, и показать человеку, измерившему небеса с исключительно малой базой, его собственное величие.

Сохраним же тщательно и умножим сокровищницу этих возвышенных знаний, отраду мыслящих существ. Эти знания сослужили важную службу мореплаванию и географии. Но их гораздо большее значение состоит в том, что они рассеяли страхи, вызываемые некогда небесными явлениями, и уничтожили заблуждения, рождавшиеся от незнания наших истинных отношений с природой.

Заблуждения и страхи, которые очень скоро возродились бы, если бы светоч науки погас.

# ПРИМЕЧАНИЯ

## Примечание I

Иезуит Гобиль, лучше всех миссионеров знакомый с китайской астрономией, опубликовал отдельно ее историю. Он снова изложил древнюю часть этой истории в XXVI томе «Назидательных писем», а я опубликовал в «Connaissance des Temps» за 1809 г. драгоценную рукопись этого иезуита о солнцестояниях и меридианных тенях гномона, наблюденных в Китае. Из этих работ видно, что Чжоу Гун наблюдал меридианные тени гномона высотою в 8 китайских футов в солнцестояниях в городе Лоян в Хэнани. Он с большой тщательностью провел линию меридиана и отнивелировал площадку, на которую падала тень. Он нашел, что длина меридианной тени была полтора фута при летнем солнцестоянии и 13 футов — при зимнем. Чтобы вывести из этих наблюдений наклонность эклиптики, в них надо внести несколько поправок. Самая большая из них — это поправка за полудиаметр Солнца. Ясно, что, так как конец тени гномона указывает высоту верхнего края этого светила, из этой высоты надо вычесть его видимый полудиаметр, чтобы получить высоту его центра. Удивительно, что все древние наблюдатели, даже из Александрийской школы, пренебрегали такой существенной и столь простой поправкой, что вносило в их географические широты ошибки, почти равные этому полудиаметру. Вторая поправка относится к астрономической рефракции. Она не была наблюдена, однако без заметной ошибки можно предположить, что она соответствует температуре в 10° и высоте барометра в 0.76 м. Наконец, третья поправка зависит от параллакса Солнца и приводит эти наблюдения к центру Земли. Внеся эти три поправки в вышеупомянутые наблюдения, находим высоту центра Солнца, отнесенную к центру Земли, равную $87.^g9049$ [$79.^\circ1144$] при летнем солнцестоянии и $34.^g7924$ [$31.^\circ3132$] — при зимнем. Эти величины для высоты полюса в Лояне дают значение, равное $38.^g6513$ [$34.^\circ7862$], — результат, близкий к среднему из наблюдений, выполненных иезуитскими миссионерами в этом городе; они дают еще $26.^g5563$ [$23.^\circ9007$] для наклонности эклиптики в эпоху Чжоу Гуна, которую можно без большой ошибки отнести к 1100 г. до н. э. Возвращаясь к этой эпохе, по формуле, приведенной в шестой книге моей «Небесной механики», находим, что наклон эклиптики должен был быть в то время равен $26.^g5161$ [$23.^\circ8645$]. Полученная разница в $402^{cc}$ [$130''$] покажется очень маленькой, если принять во внимание неуверенность, которая еще существует в определениях масс планет и в наблюдениях гномона, особенно из-за полутени, дающей его тень плохо очерченной.

Чжоу Гун наблюдал еще положение зимнего солнцестояния по отношению к звездам и определил его в 2 китайских градуса от Ню — китайского созвездия, начинающегося с ε Водолея. В Китае деление окружности всегда было подчинено длине года, так что Солнце описывало 1 китайский градус в сутки, и, если предположить, что год в эпоху Чжоу Гуна был равен $365^1/_4$ суткам, 2 китайских градуса соответствовали $2.^{g}1905$ [$1.^{\circ}9715$]. Так как положение звезды в ту эпоху относили к экватору, прямое восхождение звезды было по этим наблюдениям равно $297.^{g}8096$ [$268.^{\circ}0295$]. По формулам «Небесной механики» в 1100 г. до н. э. оно должно было быть $298.^{g}7265$ [$268.^{\circ}8539$]. Чтобы уничтожить разность в $9169^{cc}$ [$2970''$], достаточно удалиться еще на 54 года, что не так много, если вспомнить, что эпоха наблюдений этого великого правителя известна недостаточно точно, особенно были неточны сами наблюдения. Неуверенность существует и относительно определения момента солнцестояния. Но самая большая ошибка, которой можно опасаться, заключается в способе привязки солнцестояния к звезде ε Водолея, независимо от того, использовал ли Чжоу Гун разность моментов прохождения звезды и Солнца через меридиан или измерял расстояние Луны от этой звезды в момент лунного затмения, так как китайские астрономы применяли оба эти способа.

## Примечание II

Из длинного ряда наблюдений халдеи узнали, что за 19 756 суток Луна делает 669 обращений относительно Солнца, 717 аномалистических обращений, т. е. отнесенных к точкам, где ее скорость наибольшая, и 726 — относительно своих узлов. Они прибавляли 4/45 окружности к положению двух светил, чтобы в этом интервале получилось 723 звездных обращения Луны и 54 таких же обращений Солнца. Птолемей, говоря об этом периоде, приписал его древним астрономам, не указав на халдеев. Но Геминус, современник Суллы, в дошедших до нас «Элементах астрономии», не оставляет никакого сомнения в этом отношении. Он не только приписывает этот период халдеям, но приводит даже их метод вычисления лунной аномалии. Они предполагали, что от наименьшей до наибольшей скорости Луны ее угловое движение увеличивалось на $1/3^{g}$ в сутки в течение половины аномалистического оборота и замедлялось таким же образом за его вторую половину. Они ошибались, считая равномерными изменения скорости, которые пропорциональны косинусу углового расстояния Луны от ее перигея. Несмотря на эту ошибку, применявшийся ими метод делает честь мудрости халдейских астрономов. Это единственный астрономический памятник такого рода, оставшийся нам от времен до основания Александрийской школы. Период, о котором идет речь, предполагает длину звездного года равной приблизительно $365^1/_4$ суткам. Период же в 365.2576 суток, который аль-Батани приписывает халдеям, может относиться поэтому только к временам после Гиппарха.

## Примечание III

Во второй книге своей «Географии», в главе IV, Страбон говорит, что, по Гиппарху, отношение тени к гномону в городе Византии [ныне Стамбул] такое же, как то, которое, по утверждению Пифея, он наблюдал в Марселе. А в главе V той же книги он говорит, что, по Гиппарху, в Византии в летнее солнцестояние отношение тени к гномону равно 42 без 1/5 к 120. Несомненно, на основании этого наблюдения Птолемей в главе VI второй книги «Альмагеста» проводит через Марсель параллель, на которой наибольшая длина дня года равна 5/8 астрономических суток. А это предполагает, что отношение меридианной тени к гномону при летнем солнцестоянии равно 42 без 1/3 к 120.

Пифей был, самое позднее, современником Аристотеля. Поэтому без заметной ошибки его наблюдение можно отнести 350 г. до н. э. Учитывая влияние рефракции, параллакса Солнца и его полудиаметра, получаем $21.^{g}6386$ [$19.^{\circ}4747$] для расстояния центра Солнца от зенита Марселя во время летнего солнцестояния. Широта обсерватории этого города равна $48.^{g}1077$ [$43.^{\circ}2969$]. Если из нее вычесть предыдущую величину, получим наклонность эклиптики во времена Пифея, равную $26.^{g}4691$ [$23.^{\circ}8222$]. Ее сравнение с наклонностью в эпоху Чжоу Гуна уже указывает на уменьшение этого элемента. Формулы «Небесной механики» дают наклонность за 350 лет до н. э., равную $26.^{g}4095$ [$23.^{\circ}7686$]. Разность в $596^{cc}$ [193″] между этим результатом и результатом Пифея лежит в пределах погрешностей такого рода наблюдений.

## Примечание IV

Путем сравнения очень большого числа затмений Луны Гиппарх нашел следующее:

1. В промежутке в 126 007 плюс 1/24 суток Луна делает 4267 обращений относительно Солнца, 4573 обращения относительно своего перигея и 4612 обращений относительно звезд без $8^{g}1/3$ [$7.^{\circ}5$].

2. За 5458 синодических месяцев она делает 5923 обращения относительно своих узлов. В соответствии с этим движения Луны в интервале 126 007 1/24 суток равны:

| | | |
|---|---|---|
| по отношению к Солнцу | $1\,706\,800^{g}$ | [1 536 120°] |
| по отношению к перигею | $1\,829\,200^{g}$ | [1 646 280°] |
| по отношению к узлам | $1\,852\,212.^{g}89368$ | [$1\,666\,991.^{\circ}60431$] |

Сравнение этих движений с выведенными по совокупности всех современных наблюдений должно сделать очень ощутимым ускорение, предсказанное теорией всемирного тяготения. Те движения, которые были определены таким способом для начала этого века, на самом деле для того же промежутка времени дают предыдущие значения, увеличенные, соответственно, на $2657.^{cc}0$ [860.″9], $10\,981.^{cc}9$ [3558.″1] и $432.^{cc}8$ [140.″2]. Ускорение этих трех движений от Гиппарха до наших

дней очевидно. Кроме того, видно, что ускорение движения Луны относительно Солнца приблизительно в четыре раза меньше, чем ускорение ее движения относительно перигея, и в то же время значительно превышает ускорение движения относительно узла. Это приблизительно согласуется с теорией тяготения, по которой эти ускорения находятся в отношении 1, 4.70197, 0.38795. Гиппарх предполагал, что Вавилон находится восточнее Александрии на 3472 с [$3000^{s}$] по времени. По наблюдениям Бошана, он восточнее еще на 557 с [$481^{s}$], что должно несколько увеличить средние лунные движения, выведенные Гиппархом из сравнения своих наблюдений с наблюдениями халдеев.

Птолемей не сообщил нам эпохи лунных движений Гиппарха. Но малость тех изменений, которые он позволил себе внести в эти движения, и его стремление приблизить свои результаты к результатам этого великого астронома, которое он постоянно проявлял, позволяют думать, что эпоха Гиппарха мало отличалась от эпохи таблиц Птолемея, которые дают на эпоху Набонассара, т. е. на 26 февраля 746 г. до н. э. в полдень среднего времени в Александрии:

| | | | |
|---|---|---|---|
| расстояние Луны | от Солнца | $78.^{g}4630$ | [$7.^{\circ}06167$] |
| | от перигея | $98.^{g}6852$ | [$88.^{\circ}8167$] |
| | от восходящего узла | $93.^{g}6111$ | [$84.^{\circ}2500$] |

Если возвратиться к этой эпохе, используя средние движения, определенные для начала нашего века по одним только современным наблюдениям, и, кроме того, если предположить, в соответствии с последними наблюдениями, что Александрия восточнее Парижа на 7731.48 с [$6680.^{s}00$], находим расстояния, меньшие приведенных, соответственно, на следующие величины: $-1.^{g}6316$ [$-1.^{\circ}4684$]; $-7.^{g}6569$ [$-6.^{\circ}8912$]; $-0.^{g}8205$ [$0.^{\circ}7384$]. Эти разности слишком велики, чтобы их приписать ошибкам как древних, так и современных определений, что неоспоримо доказывает ускорение лунных движений и необходимость вековых уравнений. Вековое уравнение расстояния от Солнца до Луны, совпадающее с таковым для среднего движения Луны, так как движение Солнца равномерно, в эпоху Набонассара становится равным $2.^{g}0480$ [$1,^{\circ}8432$]. Чтобы получить уравнения расстояния Луны от ее перигея и восходящего узла для той же эпохи, надо умножить приведенные выше величины, соответственно, на числа 4.70197 и 0.38795. Так получаются три вековых уравнения: $2.^{g}0480$ [$1.^{\circ}8432$]; $9.^{g}6299$ [$8.^{\circ}6669$]; $0.^{g}7945$ [$0.^{\circ}7150$]. Прибавляя их к трем предыдущим разностям, получим: $+4164^{cc}$ [$+1349''$]; $+19730^{cc}$ [$+6392''$]; $-260^{cc}$ [$-84''$]. Полученные таким способом разности могут зависеть от ошибок древних и современных наблюдений. Например, среднее вековое движение узла, определенное из наблюдений Брадлея и сравненное с наблюдениями последних лет, т. е. с наблюдениями, сделанными через полвека, может содержать погрешность, по меньшей мере, в $1/2^{c}$.

## Примечание V

Астрономы аль-Мамуна из своих наблюдений нашли, что наибольшее уравнение центра Солнца равно 2.$^g$2037 [1.°9833] — больше нашего на 655$^{cc}$ [212″]. Аль-Батани, Ибн-Юнус и множество других арабских астрономов в полученных ими данных очень мало удалялись от этого результата, который неоспоримо доказывает уменьшение эксцентриситета земной орбиты с тех пор и до нашего времени. Эти же астрономы нашли долготу апогея Солнца в 830 г. равной 91.$^g$8333 [82.°6500], что хорошо согласуется с теорией тяготения, по которой эта долгота в ту же эпоху должна была быть 92.$^g$047 [82.°842]. Для годичного движения апогея Солнца относительно звезд эта теория дает 36.$^{cc}$44 [11.″81], а предыдущее наблюдение дает такое же движение с точностью до 2$^{cc}$. Наконец, сравнивая арабские наблюдения равноденствий с наблюдениями Птолемея, они нашли продолжительность тропического года равной 365.240706 суток. Около 803 г., больше чем за 25 лет до составления «Исправленных таблиц», арабский астроном альне-Вахенди, сравнивая свои наблюдения с гиппарховскими, нашел значительно более точную величину продолжительности года. Он определил ее в 365.242181 суток. Почти все арабские астрономы предполагали, что наклонность эклиптики равна 26.$^g$2037 [23.°5833]. Но представляется, что этот результат искажен неправильным параллаксом, который они приписывали Солнцу. Это несомненно относится к наблюдениям, по крайней мере, Ибн-Юнуса, которые после исправления этого ошибочного параллакса и учета рефракции дают для этой наклонности в 1000 г. 26.$^g$1932 [23.°5739]. Теория для этой же эпохи дает 26.$^g$2009 [23.°5808], и разница в —77$^{cc}$ [—25″] оказывается в пределах погрешностей арабских наблюдений. Эпохи астрономических таблиц Ибн-Юнуса подтверждают вековые уравнения движения Луны. Большие неравенства Юпитера и Сатурна также подтверждаются этими эпохами и соединением этих двух планет, наблюденным Ибн-Юнусом в Каире. Это наблюдение, одно из наиболее важных в арабской астрономии, относится к 0.$^d$16 среднего парижского времени. 31 октября 1007 г. Ибн-Юнус получил избыток геоцентрической долготы Сатурна над таковой Юпитера, равный 4444$^{cc}$ [1440″]. Таблицы, составленные г-ном Буваром по моей теории и по совокупности наблюдений Брадлея, Маскелайна и Королевской обсерватории, дают для этого избытка величину 5191$^{cc}$ [1682″]. Разность в 747$^{cc}$ [242″] меньше возможной погрешности этого наблюдения.

## Примечание VI

Наблюдения меридианных теней гномона, выполненные Го Шоуцзинем и опубликованные в «Connaissance des Temps» за 1809 г., дают для наибольшего уравнения Солнца в 1280 г. значение 2.$^g$1759 [1.°9583], что превышает его современную величину на 377$^{cc}$ [122″]. На ту же эпоху они дают еще наклонность эклиптики, равную 26.$^g$1489 [23.°5340],

т. е. большую теперешней на 757$^{cc}$ [245″]. Таким образом, упомянутыми выше наблюдениями доказывается уменьшение этих двух элементов.

Наблюдения наклонности эклиптики, сделанные Улугбеком, исправленные с учетом рефракции и параллакса, дают для эпохи 1437 г. величину 26.$^{g}$1444 [23.°5300]. Как это и должно быть, она меньше предыдущей, из-за разности в 157 лет, разделяющей эпохи, соответствующие наблюдениям. Следующая таблица с очевидностью показывает последовательное уменьшение этого элемента в интервале в 2900 лет.

| | | Наклонность эклиптики | Избыток этой наклонности над результатами, полученными по формулам небесной механики |
|---|---|---|---|
| Чжоу Гун | 1100 г. до н. э. | 26$^{g}$.5563 [23°.9007] | 402$^{cc}$ [130″] |
| Пифей | 350 г. до н. э. | 26$^{g}$.4691 [23°.8222] | 596$^{cc}$ [193″] |
| Ибн-Юнус | 1000 г. | 26$^{g}$.1932 [23°.5739] | —77$^{cc}$ [—25″] |
| Го Шоуцзин | 1280 г. | 26$^{g}$.1489 [23°.5340] | —62$^{cc}$ [—20″] |
| Улугбек | 1437 г. | 26$^{g}$.1444 [23°.5300] | 130$^{cc}$ [42″] |
| В | 1801 г. | 26$^{g}$.0732 [23°.4659] | — — |

## Примечание VII и последнее

Как указывалось в предыдущей главе, для определения причины первоначальных движений планетной системы, мы имеем пять следующих явлений: движение планет в одном направлении и почти в одной плоскости; движение спутников в том же направлении, как и их планеты; вращение всех этих тел и Солнца в сторону их поступательного движения и в мало различающихся плоскостях; малость эксцентриситетов орбит планет и спутников и, наконец, большой эксцентриситет кометных орбит, хотя их наклонности предоставлены случаю.

Насколько я знаю, Бюффон — единственный человек, который после открытия истинной системы мира пытался вернуться к вопросу о возникновении планет и спутников. Он полагал, что комета, упав на Солнце, вырвала поток материи, которая собралась вдали в большие или меньшие шары, более или менее удаленные от этого светила, и после охлаждения эти шары стали твердыми темными планетами и их спутниками.

Эта гипотеза удовлетворяет первому из пяти упомянутых явлений, так как ясно, что все тела, образованные таким способом, должны двигаться приблизительно в плоскости, проходящей через центр Солнца и в направлении выброса материи, из которой они произошли. Четыре других явления представляются мне таким способом необъяснимыми. В самом деле, абсолютное движение молекул планеты должно быть направлено в этом случае в сторону движения ее центра тяжести. Но отсюда совсем не следует, что вращение планеты будет направлено в ту же сторону. Так, Земля могла бы вращаться с востока на запад, в то время как абсолютное движение каждой из ее молекул было бы направлено

с запада на восток. Это должно быть применимо и к спутникам, у которых, по данной гипотезе, направление обращения не обязательно будет совпадать с направлением движения планеты.

Явление, не только очень трудно объяснимое при этой гипотезе, но даже противоречащее ей, — это малый эксцентриситет планетных орбит. Из теории центростремительных сил известно, что если тело движется по замкнутой орбите вокруг Солнца и касается поверхности этого светила, оно будет постоянно возвращаться к этому в каждом своем обращении. Отсюда следует, что если бы планеты изначально оторвались от Солнца, они касались бы его при каждом возвращении и их орбиты были бы далеки от круговых, но сильно эксцентричными. Правда, поток материи, вырванный из Солнца, не может быть в точности сравним с шаром, касающимся его поверхности. Импульсы, получаемые одними частями этого потока от других, и взаимное притяжение между ними могут, изменяя направление их движения, отдалить их перигелии от Солнца. Но их орбиты должны были бы остаться очень эксцентричными или, по меньшей мере, могли бы все иметь малые эксцентриситеты только в результате самой необычной случайности. Наконец, если принять гипотезу Бюффона, не ясно, почему орбиты более чем ста уже наблюденных комет — все сильно вытянутые. Таким образом, эта гипотеза далеко не удовлетворяет приведенным выше явлениям. Посмотрим, возможно ли найти их истинную причину.

Какова бы ни была ее природа, поскольку эта причина породила или направила движения планет, нужно чтобы она охватывала все эти тела, а имея в виду огромные разделяющие их расстояния, она может быть только флюидом [газом], имеющим колоссальную протяженность. Чтобы сообщить планетам почти круговое движение в одном направлении вокруг Солнца, надо, чтобы этот флюид окружал это светило как некая атмосфера. Поэтому рассмотрение планетных движений приводит нас к мысли, что в силу чрезмерной жары атмосфера Солнца вначале распространялась за пределы орбит всех планет и что она постепенно сжалась до ее современных границ.

В первоначальном состоянии, в котором предположительно находилось Солнце, оно было похоже на туманность, видимую в телескоп как более или менее блестящее ядро, окруженное облаком, которое, конденсируясь на поверхности ядра, превращает его в звезду. Если по аналогии принять, что все звезды образованы таким образом, можно представить себе их состояние, предшествующее туманности, как предшествуемое другими состояниями, в которых туманная материя была все более и более разреженной, а ядро все менее и менее ярким. Таким путем, отступая столь далеко, как только возможно, мы приходим к такой разреженной туманности, что с трудом можно было бы подозревать о ее существовании.

С давних времен особое расположение некоторых звезд, видимых простым глазом, поражало мыслящих наблюдателей. Уже Митчелл заметил, насколько маловероятно, чтобы, например, звезды Плеяд были сосредоточены в тесном пространстве только по воле случая; и он решил, что эта группа звезд и другие похожие группы, видимые на небе, являются

результатом действия первоначальной причины или всеобщего закона природы. Эти группы являются необходимым результатом конденсации туманностей с несколькими ядрами, так как ясно, что поскольку туманная материя непрерывно притягивалась этими ядрами, с течением времени они должны были образовать группу звезд, похожую на группу Плеяд. Подобно этому конденсация туманностей, имеющих два ядра, образует очень близкие звезды, обращающиеся одна вокруг другой, такие как двойные звезды, у которых уже обнаружены их движения одной относительно другой.

Но как солнечная атмосфера установила вращательное движение и обращение планет и спутников? Если бы эти тела проникли глубоко в эту атмосферу, ее сопротивление заставило бы их упасть на Солнце. Следовательно, можно предположить, что планеты сформировались последовательно на своих границах, путем конденсации зон паров, которые она должна была, охлаждаясь, оставлять в плоскости своего экватора.

Напомним соображения, приведенные нами выше, в VI главе предыдущей книги. Солнечная атмосфера не может простираться бесконечно. Ее граница лежит там, где центробежная сила, вызванная ее вращательным движением, уравновешивается ее весом; а по мере того, как охлаждение сжимает атмосферу и конденсирует на поверхности светила молекулы, близкие к ней, вращательное движение увеличивается, так как при приближении этих молекул к центру Солнца в силу закона площадей сумма площадей, описанных радиусом-вектором каждой молекулы Солнца и его атмосферы и спроектированных на плоскость его экватора, должна быть постоянной; вращение должно быть более быстрым, когда эти молекулы приближаются к центру Солнца. Так как центробежная сила, обусловленная этим движением, становится больше, точка, в которой она уравновешивается силой тяжести, приближается к центру. Поэтому если сделать вполне естественное предположение, что атмосфера в некоторую эпоху распространялась до своего предела, охладившись, она должна была оставить молекулы, расположенные на этом пределе и на следующих пределах, образованных возрастанием вращения Солнца. Такие оставленные молекулы продолжали обращаться вокруг этого светила, поскольку их центробежная сила была уравновешена их тяготением. Но так как это равенство не имело места по отношению к молекулам атмосферы, находившимся вне плоскости солнечного экватора, они приближались под влиянием своего тяготения к атмосфере по мере ее конденсации и не переставали ей принадлежать до тех пор, пока, благодаря этому движению, не приближались к экватору.

Рассмотрим теперь зоны паров, последовательно оставленные атмосферой. Эти зоны, по всей вероятности, должны были образовать при своей конденсации и в силу взаимного притяжения их молекул концентрические кольца из паров, обращающиеся вокруг Солнца. Взаимное трение молекул каждого кольца должно было ускорять одни из них и замедлять другие до тех пор, пока все они не приобретут одинаковое угловое движение. Таким образом, истинные скорости молекул, более отдаленных от центра светила, были больше. Еще одна причина должна была

способствовать различию скоростей. Более отдаленные от Солнца молекулы, которые вследствие охлаждения и конденсации сблизились, образуя внешнюю часть кольца, всегда описывали площади, пропорциональные времени, так как приложенная к ним центростремительная сила была неизменно направлена к этому светилу, а постоянство площадей по мере их сближения требует возрастания скорости. Мы видим, что та же причина должна была уменьшить скорость молекул, которые, поднявшись к кольцу, образовали его внутреннюю часть.

Если бы все молекулы кольца, состоявшего из паров, продолжали конденсироваться, не разъединяясь, они со временем образовали бы жидкое или твердое кольцо. Но для этого требуется большая равномерность в распределении и охлаждении всех частей кольца, что должно было сделать это явление исключительно редким. Так, солнечная система дает нам только один такой пример, а именно кольца Сатурна. Почти всегда каждое кольцо пара должно было разорваться на несколько отдельных масс, которые, двигаясь с очень близкими скоростями, продолжали обращаться на том же расстоянии вокруг Солнца. Эти массы должны были принять сфероидальную форму с вращательным движением, направленным в сторону их обращения, так как их внутренние молекулы имели меньшую истинную скорость, чем внешние. Каждая такая масса образовала планету в парообразном состоянии. Но если бы одна из них оказалась достаточно мощной, чтобы последовательно путем притяжения собрать все остальные вокруг своего центра, кольцо из паров превратилось бы в одну единственную сфероидальную массу пара, обращающуюся вокруг Солнца и вращающуюся в ту же сторону. Этот последний случай был наиболее общим. Однако солнечная система являет нам и первый случай в виде четырех малых планет, движущихся между Юпитером и Марсом, по крайней мере, если не предполагать, подобно г-ну Ольберсу, что они первоначально составляли одну планету, которую сильный взрыв разделил на несколько частей, движущихся с разными скоростями.

Теперь, если проследить изменения, которые должно было произвести дальнейшее охлаждение парообразных планет, образование которых описано выше, мы увидим в центре каждой из них ядро, непрерывно увеличивающееся за счет конденсации окружающей его атмосферы. В этой стадии планета очень похожа на Солнце в состоянии туманности, в котором мы его рассматривали выше. Поэтому охлаждение должно было на разных рубежах ее атмосферы последовательно произвести явления, подобные уже описанным нами, т. е. создать кольца и спутники, обращающиеся вокруг ее центра в сторону ее вращательного движения и вращающиеся вокруг самих себя в ту же сторону. Правильное распределение массы колец Сатурна вокруг его центра и в плоскости его экватора естественно вытекает из этой гипотезы, а без нее становится необъяснимым. Эти кольца, как мне представляется, являются постоянно существующим доказательством первоначальной протяженности атмосферы Сатурна и ее последовательного сжатия. Таким образом, странные явления малого эксцентриситета орбит планет и спутников, малого наклона этих орбит к плоскости солнечного экватора, одинаковость направлений

вращения и обращения всех этих тел и Солнца вытекают из предлагаемой нами гипотезы и придают ей большую вероятность, которая может быть еще увеличена следующим соображением.

Так как согласно этой гипотезе, все тела, обращающиеся вокруг планеты, были образованы зонами, которые последовательно покидала ее атмосфера, ее вращение становилось все быстрее, а время оборота уменьшалось, становясь меньше, чем у этих тел, подобно тому, как это имеет место у Солнца по сравнению с планетами.* Все это подтверждается наблюдениями. Продолжительность оборота наиболее близкого кольца Сатурна, по наблюдениям Гершеля, равна $0.^{d}438$, а время оборота Сатурна только $0.^{d}427$. Разность в $0.^{d}011$ незначительна, как это и должно быть, так как часть атмосферы Сатурна, которую уменьшение температуры сконденсировало на поверхности этой планеты после образования кольца, будучи незначительной и переместившейся с небольшой высоты, смогла лишь ненамного увеличить скорость вращения планеты.

Если бы солнечная система образовалась с совершенной правильностью, орбиты тел, которые ее составляют, были бы окружностями, плоскости которых, а также плоскости экваторов и колец, совпадали бы с плоскостью солнечного экватора. Но можно понять, что бесконечное разнообразие, которое должно было существовать в температуре и плотности различных частей этих больших масс, произвело эксцентриситеты их орбит и отклонения их движений от плоскости солнечного экватора.

По нашей гипотезе, кометы считаются посторонними по отношению к планетной системе. Рассматривая их, что мы уже делали, как маленькие туманности, блуждающие от одной солнечной системы к другой и образованные путем конденсации туманной материи, распространенной в таком изобилии во вселенной, мы видим, что если они появляются в той части пространства, где преобладает солнечное притяжение, оно заставляет их описывать эллиптические или гиперболические орбиты. Но так как их скорости одинаково возможны во всех направлениях, они должны двигаться равновероятно во все стороны и под любыми углами наклона к эклиптике, что согласуется с наблюдениями. Таким образом, конденсация туманной материи, с помощью которой мы объяснили вращение и обращение планет и спутников в одинаковом направлении и в мало отличающихся плоскостях, объясняет также причины отклонения комет от этого общего закона.

Большой эксцентриситет кометных орбит также вытекает из нашей гипотезы. Если эти орбиты эллиптические, они сильно вытянуты, так как

---

* Кеплер в своей работе «О движении светила Марс» объяснил движение всех планет в одном направлении с помощью чего-то нематериального, излучаемого с поверхности Солнца, что, сохраняя вращательное движение, которое оно имело на поверхности, передало его планетам. Он заключил, что Солнце вертится вокруг самого себя за время, меньшее чем длительность обращения Меркурия; это вскоре было подтверждено Галилеем из наблюдений. Гипотеза Кеплера, несомненно, неприемлема. Но замечательно и представляется естественным, что одинаковость направления планетных движений он поставил в зависимость от вращения Солнца.

их большие оси, по крайней мере, равны радиусу сферы активного действия Солнца. Но эти орбиты могут быть и гиперболическими и, если оси этих гипербол не очень велики по сравнению со средним расстоянием от Солнца до Земли, движения комет, которые их описывают, покажутся существенно гиперболическими. Однако, по меньшей мере, из ста комет, элементы которых уже известны, ни одна не оказалась движущейся по гиперболе. Следовательно, вероятность обнаружить существенно гиперболическую орбиту исключительно мала сравнительно с противоположной вероятностью. Кометы так малы, что становятся видимыми только тогда, когда их перигельное расстояние незначительно. До сих пор это расстояние не превышало двойного диаметра земной орбиты, а чаще всего было меньше ее радиуса. Нетрудно понять, что для того, чтобы так близко приблизиться к Солнцу, их скорость в момент входа в сферу его действия должна иметь величину и направление, заключенные в узких пределах. Определяя методами анализа вероятностей отношение случаев, которые в этих пределах дают существенно гиперболическую орбиту, к случаям, дающим орбиту, которую можно принять за параболическую, я нашел, что можно считать, по крайней мере, 6000 против 1, что туманность, проникающая в сферу действия Солнца таким образом, что ее можно наблюдать, опишет очень вытянутый эллипс или гиперболу, которая по величине своей оси близко совпадает с параболой в своей наблюдаемой части. Поэтому не удивительно, что до сих пор гиперболические движения не наблюдались.

Притяжение планет и, может быть, еще сопротивление эфирной среды должны были превратить многие орбиты комет в эллипсы, большая ось которых гораздо меньше радиуса сферы активности Солнца. Такое изменение может явиться результатом встречи этих светил, так как учитывая, что мы можем наблюдать только те из комет, которые достаточно близко подходят к Солнцу, из нашей гипотезы об их образовании следует, что в солнечной системе их должно быть огромное количество. Можно думать, что такое изменение претерпела орбита кометы 1759 г., большая ось которой лишь в 35 раз превосходит расстояние от Солнца до Земли. Еще больше изменились орбиты комет 1770 и 1805 гг.

Если некоторые кометы проникали в атмосферу Солнца и планет во время их образования, они должны были, описывая спирали, упасть на эти тела и своим падением отклонить их плоскости орбит и экваторов от плоскости экватора Солнца.

Если в зонах, оставленных солнечной атмосферой, находились молекулы, слишком летучие, чтобы объединиться между собой или с планетами, они должны были, продолжая обращаться вокруг этого светила, представить все видимые явления зодиакального света, не оказывая заметного сопротивления различным телам планетной системы как по причине своей исключительной разреженности, так и потому, что их движение почти такое же, как и движение встречаемых ими планет.

Углубленное изучение всех особенностей этой системы еще больше увеличивает вероятность нашей гипотезы. Первоначально жидкое состояние планет ясно подтверждается сжатием их фигуры в соответствии

с законами притяжения их молекул. Для Земли это сжатие доказано закономерным изменением силы тяжести при переходе от экватора к полюсам. Это первоначально жидкое состояние, к которому нас приводят астрономические явления, должно проявляться в явлениях, представляемых нам естественной историей. Но чтобы его обнаружить, необходимо учесть огромное разнообразие сочетаний, образованных всеми земными веществами, перемешанными в парообразном состоянии, когда понижение температуры позволило объединиться их элементам. Следует также учесть огромные изменения внутри Земли и на ее поверхности, к которым это понижение должно было постепенно привести во всех образованиях Земли: в составе и давлении атмосферы, в океане и в веществах, которые он содержал в растворенном состоянии. Наконец, надо принять во внимание такие резкие изменения, как большие извержения вулканов, которые в разные эпохи должны были нарушать правильное течение этих изменений. Геология, рассматриваемая с точки зрения, которая связывает ее с астрономией, могла бы во многом получить от нее большую точность и уверенность.

Одно из наиболее странных явлений в солнечной системе — это точное равенство, наблюдаемое между угловыми движениями вращения и обращения каждого спутника. Можно ставить бесконечность против одного, что это не случайное явление. Теория всемирного тяготения устраняет бесконечность этой невероятности, показывая нам, что для существования такого явления достаточно, чтобы первоначально эти движения мало различались между собой. Тогда притяжение планеты установит между ними идеальное равенство. Но в то же время оно породит периодические колебания оси спутника, направленной к планете, колебания, величина которых зависит от первоначальной разности двух движений.

Так как наблюдения либрации Луны, выполненные Майером, а также сделанные по моей просьбе г-ном Буваром и Николе, не позволили обнаружить эти колебания, разность, от которой они зависят, должна быть очень маленькой. Это с большой вероятностью указывает на существование особой причины, сперва заключившей эту разность в очень узкие пределы, в которых притяжение планеты могло установить между средними движениями вращения и обращения строгое равенство, и затем уничтожившей колебания, порожденные этим равенством. Оба эти явления вытекают из нашей гипотезы, так как можно понять, что Луна в парообразном состоянии, благодаря мощному притяжению Земли, представляла собой вытянутый сфероид, большая ось которого непрерывно направлялась к этому светилу из-за той легкости, с которой пары уступают самым малым силам, приводящим их в движение. Земное притяжение, продолжая действовать так же, как и в то время, когда Луна была в состоянии флюида, непрерывно сближая два движения этого спутника, с течением времени должно было заставить их разность попасть в пределы, в которых начинается установление их точного равенства. Затем это притяжение должно было постепенно уничтожить колебания, вызванные этой разностью в большой оси сфероида, направленной к Земле. Именно так

флюиды, покрывающие эту планету, разрушили своим трением и сопротивлением первоначальные колебания ее оси вращения, которой теперь присуща только нутация, происходящая от действия Солнца и Луны. Легко убедиться, что равенство вращения и обращения спутников должно было препятствовать образованию колец и вторичных спутников из атмосфер этих тел. Наблюдения также до сих пор не обнаружили ничего подобного.

Движения первых трех спутников Юпитера представляют еще более необычайное явление, чем предыдущее. Оно состоит в том, что средняя долгота первого из них без утроенной средней долготы второго в сумме с удвоенной долготой третьего постоянно равна двум прямым углам. Можно держать пари, ставя бесконечность против единицы, что это равенство — явление не случайное. Но мы видели, что для его установления достаточно, чтобы первоначальные средние движения этих трех тел были близки к тому, чтобы удовлетворять отношению, приводящему к нулю среднее движение первого без утроенного движения второго, плюс удвоенное движение третьего спутника. Тогда их взаимное притяжение в точности устанавливает это отношение и к тому же делает постоянно равной полуокружности среднюю долготу первого спутника без утроенной средней долготы второго, сложенную с удвоенной долготой третьего. В то же время оно порождает периодическое неравенство, зависящее от небольших отклонений первоначальных средних движений от указанного нами соотношения. Несмотря на все старания, приложенные Деламбром, ему не удалось из наблюдений обнаружить это неравенство. Это доказывает его исключительную малость и, стало быть, с очень большой вероятностью указывает причину, заставившую его исчезнуть. По нашей гипотезе, спутники Юпитера непосредственно после своего образования двигались не в абсолютной пустоте. Наименее склонные к конденсации молекулы первоначальных атмосфер Солнца и планеты составляли тогда разреженную среду, различное сопротивление которой для каждого из этих светил могло постепенно приближать их средние движения к тому соотношению, о котором идет речь; и когда эти движения достигли условий, требуемых для того, чтобы взаимное притяжение трех спутников в точности установило это соотношение, то же сопротивление непрерывно уменьшало неравенство, рожденное этим соотношением, и наконец сделало его неощутимым. Нельзя придумать лучшего сравнения для этого явления, чем сравнение его с движением маятника, запущенного с большой скоростью в среде с очень малым сопротивлением. Сперва он опишет большое число окружностей, но с течением времени его круговое движение, все время уменьшаясь, превратится в колебательное, которое затем, затухая все больше и больше из-за сопротивления среды, наконец остановится, и тогда маятник, придя в состояние покоя, останется в нем навсегда.

*Конец шестого тома*

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## КОММЕНТАРИИ

1. Здесь «сильный свет» означает, очевидно, общее количество солнечного света, отраженного поверхностью Земли, количества, которое Лаплас принимает пропорциональным ее поверхности, в 13 раз превосходящей поверхность Луны, без учета различия в отражательной способности (альбедо) их поверхностей. Между тем, благодаря наличию у Земли атмосферы с облаками и снежного покрова, она отражает около 40% падающего на нее солнечного света, тогда как Луна отражает всего лишь 7%, что еще в 5 с лишним раз увеличивает различие между светом земных и лунных фаз.

2. Под небольшими неравенствами во вращении Луны здесь подразумевается так называемая физическая либрация — покачивание Луны относительно направления к Земле наподобие маятника, вызванное тем, что Луна немного удлинена в сторону Земли вследствие застывшей на Луне приливной волны. В результате центр массы Луны смещен примерно на 1 км относительно центра ее фигуры, так что Луну можно уподобить маятнику с амплитудой колебаний около 100″. При рассмотрении с Земли эти колебания уменьшаются в отношении радиуса Луны к ее расстоянию от Земли, т. е. в 220 раз, и вызывают действительные покачивания всего лишь в несколько десятых долей секунды дуги, едва уловимые из наблюдений.

3. Способ определения солнечного параллакса из наблюдений прохождения Венеры по диску Солнца был предложен Галлеем в 1691 г. и впервые применен во время прохождения Венеры в 1761 г., для чего был организован ряд экспедиций в отдаленные страны. Хотя геометрическая сторона этого способа безупречна, наблюдения не оправдали возлагавшихся на них надежд из-за особого явления — дифракции света, вследствие которой оказалось невозможным точно наблюдать момент внутреннего контакта краев Венеры и Солнца при вступлении Венеры на солнечный диск. Ожидалось, что соответствующий момент можно будет заметить с точностью до немногих секунд, а в действительности ошибки в его определении доходили до 1 м. Это было вызвано тем, что по вступлении Венеры на диск Солнца и при ее дальнейшем продвижении темный край Венеры еще продолжал соединяться с краем Солнца темной перемычкой, названной «черной каплей», что не позволяло заметить момент контакта краев.

Такие же наблюдения были произведены многочисленными экспедициями в 1769 г. Тщательная обработка наблюдений этих двух прохож-

дений, выполненная в 1835 г. Энке, дала для солнечного параллакса 8.″57, тогда как современное значение равно 8.″794, что на 2.5% больше.

4. Наблюдая в Петербурге прохождение Венеры в 1761 г., Ломоносов открыл у нее атмосферу.

5. Два спутника Урана были открыты Гершелем в 1787 г., два других — найдены Ласселем в 1851 г. Пятый, ближайший к планете, очень слабый спутник был открыт Койпером в 1948 г.

6. В настоящее время открыто свыше 2300 малых планет; некоторые из них движутся по сильно наклоненным к эклиптике орбитам, наклонности которых достигают 40°.

7. Угол между плоскостью небесного экватора и горизонтом равен $90° - \varphi$, где $\varphi$ — географическая широта места наблюдения. Поэтому меридианная высота $h$ светила равна его склонению $\delta + (90° - \varphi)$, откуда $\delta = \varphi + h - 90°$.

8. Собственные движения были открыты Галлеем в 1718 г. путем сравнения положений нескольких ярких звезд из каталога Птолемея в «Альмагесте» с современными. Ныне мы знаем, что все звезды движутся и эти движения вызваны перемещением самих звезд в пространстве, к которому присоединяется перспективный эффект движения солнечной системы. У большинства звезд собственные движения очень малы — меньше 1″ в столетие. Самое большое ныне известное собственное движение 10.″3 в год имеет слабая звезда 9.5 величины в созвездии Змееносца — звезда Барнарда.

9. Древнейшее дошедшее до нас определение размеров земного шара произведено в III в. до н. э. греко-египетским ученым Эратосфеном путем градусного измерения в Египте. Длина окружности земного меридиана была им определена в 250 000 стадиев, и хотя длина египетского стадия нам известна лишь приближенно, это число довольно близко к истине.

10. В экспедиции на земной экватор участвовали французские академики Бугер, Лакондамин и Годен. Проработав с 1735 по 1742 гг., они измерили в Перу дугу меридиана в 3°7′. Другая экспедиция в составе Мопертюи, Клеро, Цельсиуса и других измерила в 1735—1736 гг. дугу в 58′ по долине реки Торнео, пограничной между Швецией и Финляндией.

11. Ныне приняты: сжатие земного эллипсоида $f = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298.25}$; полуоси: $a = 6\,378\,140$ м, $b = 6\,356\,751$ м. В СССР применяются элементы эллипсоида Красовского: $a = 6\,378\,245$ м, $b = 6\,356\,863$ м, $f = \frac{1}{298.3}$.

12. Проблема определения географической долготы в путешествиях, в частности морских, была в прежние времена одной из основных и трудно решимых. Поскольку местное время определялось из астрономических наблюдений сравнительно просто, вопрос сводился к знанию в определяемом пункте времени начального меридиана, например гринвичского. Для этого служили наблюдения явлений, моменты которых были известны или могли быть вычислены по гринвичскому времени. Таковы

были затмения Луны, положения Луны среди звезд, покрытия звезд Луною, явления в системе спутников Юпитера, а с изобретением хронометра — хранение гринвичского времени в путешествиях. Каждый из этих способов имел свои ограничения, и их точность была в общем невысокой. Радикальное и точное решение этой знаменитой проблемы дал радиотелеграф, с помощью которого передаются специальные сигналы, прием которых дает гринвичское время с точностью до тысячных долей секунды.

13. Изменение длины секундного маятника, так же как и изменение силы тяжести, зависит от сжатия Земли. Для сжатия 1/298.3 коэффициент при квадрате синуса широты равен 0.00530.

14. Для мореплавателя важно наперед знать высоту прилива в данном месте и в данное время, так как с этим связаны условия навигации и пользование портами. Эта высота складывается из отдельных волн с известными периодами, здесь перечисленными, а их амплитуды различны в разных портах и определяются путем анализа многолетних наблюдений. Таким образом, высота прилива может быть представлена гармоническим рядом, каждый член которого имеет заданный период и полученную из наблюдений амплитуду. Вычисление суммы таких рядов ныне производится с помощью специальных машин, имеющих ряд колес, вращающихся с нужными периодами. Амплитуды задаются установкой соответствующих кулис, огибающий их шнур суммирует все остальные волны. Самописец на конце шнура вычерчивает на движущейся бумажной ленте уровень воды в данном порту на длительное время вперед.

15. Водяные пары, состоящие из воды в газообразном состоянии с молекулярным весом $H_2O=18$, легче сухого воздуха, состоящего из 80% азота $N_2$ с весом 28 и 20% кислорода $O_2$ с весом 32; воздух имеет молекулярный вес около 29. Для получения плотности влажного воздуха нужно из показания $B$ барометра вычесть отношение $18/29f$, где $f$ — давление водяных паров, определяемое с помощью гигрометра. Так как 18/29 очень близко к 5/8, то обычно плотность воздуха принимают пропорциональной $B - 5/8f$.

16. Полдень рекомендуется потому, что в это время изменения температуры происходят наиболее медленно.

17. Когда светило находится в зените, оно ближе к наблюдателю на радиус Земли, чем в момент, когда оно видно в горизонте. Поэтому светила, имеющие заметные диски, видны в горизонте под меньшими углами.

18. Ныне уточненное время, за которое свет проходит большую полуось земной орбиты, т. е. среднее расстояние между центрами Солнца и Земли, равно $499.^s0$.

19. Здесь имеется в виду изменение экваториальных координат звезд вследствие прецессии, что никакого отношения к их собственным движениям не имеет.

20. Во времена Лапласа самой удаленной от Солнца планетой был Уран, открытый В. Гершелем в 1781 г. Более далекие, Нептун и Плутон, открытые, соответственно, в 1846 и 1930 гг., еще не были известны.

21. Здесь речь идет о комете Галлея, периодичность появлений которой была им установлена в 1705 г.

22. Слова «импульс солнечных лучей» предвосхищают более поздние представления. Давление света было теоретически предсказано Д. Максвеллом и экспериментально доказано П. Н. Лебедевым в 1900 г.

23. Между продолжительностями синодического $S$ и сидерического $P$ обращений планеты существует равенство:

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{T}-\frac{1}{P},$$

где $T$ — сидерический год, т. е. период обращения Земли вокруг Солнца.

24. Из перечисленных здесь шести спутников Урана реальными оказались только второй и четвертый. Позднее были открыты еще три спутника. Таким образом, сейчас у Урана известны пять спутников.

| Название спутника | Автор открытия | Год открытия | Среднее расстояние от планеты | |
|---|---|---|---|---|
| | | | в радиусах планеты | в тыс. км |
| Миранда | Дж. Койпер | 1948 | 5.11 | 130.4 |
| Ариэль | В. Лассель | 1851 | 7.52 | 191.9 |
| Умбриэль | Он же | 1851 | 10.48 | 267.3 |
| Титания | В. Гершель | 1787 | 17.21 | 439.2 |
| Оберон | Он же | 1787 | 23.01 | 587.0 |

25. В часах применяется круговой маятник, подвешенный на остром ребре призмы или на гибкой пластинке. Для сохранения продолжительности его колебаний применяют возможно меньшую амплитуду, которую поддерживают постоянной.

26. Теперь, наоборот, время падения тел в вакууме определяется с очень высокой точностью и служит для вывода абсолютного значения силы тяжести.

27. Эта длина соответствует секунде, равной 1/100 000 доле суток, или 0.864 нашей секунды. Так как длина маятника пропорциональна квадрату времени его колебаний, то для получения длины секундного маятника в нашем смысле нужно указанную Лапласом длину разделить на $(0.864)^2=0.746496$, что дает 0.993812 м.

28. Здесь «два смежных элемента» означают два бесконечно малых соприкасающихся отрезка кривой, концы которых определяются тремя бесконечно близкими между собою точками; проведенная через них окружность и есть соприкасающаяся или оскулирующая окружность, радиус которой есть радиус кривизны кривой в данном месте.

29. Главные оси вращения теперь называются главными осями инерции. Одна из этих трех осей соответствует наибольшему моменту инерции, и вращение вокруг нее устойчиво. Вращение вокруг двух других осей, для которых момент инерции меньше, — неустойчиво. Вполне сим-

метричное тело, например однородный шар, имеет равные моменты инерции относительно любой оси, вокруг которой вращение устойчиво. У Лапласа в формулировке отмеченной фразы имеется неточность.

30. Если бы в периодах обращения Юпитера и Сатурна была строгая соизмеримость, то через пять обращений Юпитера, равных двум обращениям Сатурна, взаимное положение этих планет повторилось бы, как и их возмущения. При каждом последующем соединении планет возмущения суммировались бы, и наступило бы явление резонанса. Не вполне строгая соизмеримость имеет то последствие, что их взаимные возмущения постепенно изменяются, вызывая неравенство долгого периода, ранее открытое наблюдениями и теоретически объясненное Лапласом.

31. Для сравнения приводим современные значения упомянутых здесь величин.

| Название светил | Сила тяжести в единицах силы тяжести на экваторе Земли | Средняя плотность | По отношению к плотности воды |
|---|---|---|---|
| Солнце | 27.9 | 1 | 1.41 |
| Земля | 1.0 | 3.92 | 5.52 |
| Юпитер | 2.31 | 0.93 | 1.31 |
| Сатурн | 0.9 | 0.49 | 0.69 |

32. Открытое Лапласом влияние уменьшения эксцентриситета земной орбиты на среднюю долготу Луны дало ему ускорение векового движения Луны в 10.″2 за столетие, почти совпадающее с наблюдениями и обнаруженное еще Галлеем в 1693 г. Казалось, что этим была решена загадка векового ускорения Луны. Однако Адамс в 1853 г., повторивший вычисления Лапласа с учетом членов более высокого порядка, показал, что результат Лапласа завышен почти в два раза, так что еще около 5″ оставались необъясненными. Ныне мы знаем, что эта невязка происходит вследствие замедления вращения Земли под влиянием приливного трения и вызванной этим замедлением ошибки в измерении времени. Введение эфемеридного времени эту невязку устранило.

33. Неправильное заключение о постоянстве продолжительности суток вызвано ошибкой в вычислении векового ускорения Луны, которое Лаплас получил совпадающим с наблюдениями (см. комм. 32). В действительности длина суток возрастает приблизительно на $0.^s001$ в столетие, что в сочетании с правильным вековым ускорением Луны объясняет различие почти в два часа для моментов затмений Солнца и Луны, наблюденных во времена Гиппарха. Как указал Кант еще в 1754 г., морские приливы тормозят вращение Земли, что было обнаружено уже после Лапласа (см. с. 372).

34. Лаплас описывает здесь одно из двух частных решений задачи трех тел, данных Лагранжем в 1772 г., без упоминания их автора. Если три тела находятся в вершинах равностороннего треугольника и им при-

даны соответствующие по величине и направлению скорости, то такая конфигурация окажется устойчивой, причем треугольник будет вращаться в собственной плоскости. Другое решение, которое приводит Лаплас, состоит в расположении трех тел по одной прямой, которая также вращается в одной плоскости.

35. Во время Лапласа было известно 7 спутников Сатурна.

| Номера спутников в порядке возрастающего расстояния от планеты | Название спутников | Автор открытия | Год открытия |
|---|---|---|---|
| 1 | Мимас | В. Гершель | 1789 |
| 2 | Энцелад | Он же | 1789 |
| 3 | Тефия (Тефида) | Д. Кассини | 1684 |
| 4 | Диона | Он же | 1684 |
| 5 | Рея | Он же | 1672 |
| 6 | Титан | Х. Гюйгенс | 1655 |
| 7 | Япет | Д. Кассини | 1671 |
| | С тех пор найдены | | |
| Между Титаном и Япетом | Гиперион | Д. Бонд | 1848 |
| Наиболее близкий | Янус | О. Дольфюс | 1966 |
| Самый далекий | Феба | В. Пикеринг | 1898 |

36. Отношение $q$ центробежной силы на земном экваторе к силе тяжести равно 1/288, или, точнее, 0.003468, откуда $\frac{5}{4}q = 0.004335$.

37. Если через $q$ обозначить отношение центробежной силы на земном экваторе к силе тяжести и через $\beta$ — коэффициент при квадрате синуса широты, равный $\frac{g_p - g_a}{g_a}$, где $g_p$ — ускорение силы тяжести на полюсе и $g_a$ — то же на экваторе, описание Лапласа приводит к формуле:

$$g = g_a(1 + \beta \sin^2 \varphi), \quad \beta = \frac{5}{2} q - \alpha,$$

где $\alpha = \frac{a-b}{a}$ есть сжатие земного эллипсоида с полуосями: экваториальной $a$ и полярной $b$. Это — знаменитое уравнение, выведенное Клеро в 1743 г. и дающее не только силу тяжести на поверхности земного эллипсоида, но и его сжатие независимо от распределения плотности внутри. Лаплас приводит его без упоминания автора.

38. Лишь в конце XIX столетия было открыто движение полюсов на поверхности Земли и начато его систематическое изучение. Вековое движение их не превосходит нескольких сантиметров в год и совершенно недостаточно для объяснения ледниковых периодов. О движении полюсов за миллионы лет достоверных сведений не имеется.

39. Здесь Лаплас еще раз обнаруживает незнание основной причины изменения скорости вращения Земли, а именно замедления, вызванного торможением приливной волной, обегающей Землю в направлении, противоположном ее суточному вращению, на что еще в 1754 г. указал Кант (См. комм. 32).

40. Высказанные здесь соображения Лапласа о природе кольца Сатурна не привели его к окончательному выводу, причем труднее всего был вопрос об устойчивости кольца, которая казалось, должна нарушаться притяжением спутников и другими причинами. Вопрос был решен английским физиком Максвеллом в 1856 г., показавшим, что кольцо может состоять лишь из огромного числа мелких твердых частиц, каждая из которых обращается вокруг центра планеты по законам Кеплера. Промежуток между внешним и светлым внутренним кольцами — так называемая щель Кассини объясняется возмущениями от спутников. Внутреннее темное «креповое» и слегка прозрачное кольцо состоит из более разреженного роя частиц. Прямое доказательство такого строения колец получили в 1895 г. Килер в США, а затем А. Белопольский в России в Пулково с помощью спектрограмм, показавших, что кольца вращаются не как одно целое, причем, согласно третьему закону Кеплера, наружные части движутся медленнее внутренних.

41. Атмосферу Венеры открыл Ломоносов при прохождении планеты перед диском Солнца в 1761 г., чего Лаплас, по-видимому, не знал.

42. Нынешние значения этих величин таковы: постоянная нутации 9.″2, лунное неравенство 6.″5, масса Луны 1/81.3 массы Земли.

43. Здесь Лаплас еще раз утверждает, что длина суток постоянна и положение полюсов на поверхности Земли неизменно. Однако в середине XX в. было окончательно найдено вековое замедление вращения Земли, вызванное трением морских приливов, а в конце XIX в. было обнаружено сложное движение земных полюсов.

44. Утверждение Лапласа, что обратная сторона Луны навсегда останется недоступной для наблюдений, еще раз показывает, что в науке нельзя устанавливать запреты. 7 октября 1959 г. советская автоматическая станция «Луна-3» впервые сфотографировала обратную сторону Луны; и с тех пор сделано много наблюдений, которые позволили составить карту этой стороны, по детальности мало уступающую карте видимой стороны.

45. Здесь Лаплас говорит об определении апекса солнечной системы Гершелем в 1783 г. Ныне положение апекса, т. е. точки, куда направлено движение по отношению к совокупности ближайших звезд (местной системы), принимается $\alpha=270$, $\delta=+30°$ на границе созвездий Геркулеса и Лиры. Скорость движения, преувеличенная Гершелем, близка к 20 км/с.

46. Двойная звезда 61 Лебедя была подробно изучена Бесселем, внимание которого привлекло ее исключительно большое собственное движение, равное приблизительно 5″ в год и указывающее на близость этой звезды к нам. В 1838 г. Бессель впервые определил годичный параллакс ее в 0.″35, соответствующий расстоянию в 9.3 световых лет.

47. Здесь высказаны мысли, позже развитые Пуанкаре, Минковским и другими предшественниками теории относительности Эйнштейна.

48. Еще более яркое подтверждение теория всемирного тяготения получила благодаря открытию Нептуна в 1846 г., положение которого на небе было указано вычислениями Леверрье и Адамса на основании возмущений, которые Нептун производил в движении Урана.

49. Лаплас коренным образом изменил свою интерпретацию наблюдаемых туманностей. В третьем издании «Изложения системы мира» (1808 г.) он аргументирует в пользу того, что туманности (внегалактические) являются огромными звездными системами наподобие Млечного пути и находятся от нас так далеко, что должны представляться нам практически неподвижными, и поэтому по отношению к ним нужно относить положения всех других светил. Эти пророческие слова оправдались, и мы теперь, 180 лет спустя, начали это делать. Но в четвертом издании (1813 г.) Лаплас приводит доводы в пользу того, что наблюдавшиеся Гершелем туманности являются объектами нашей Галактики, следовательно, несравненно меньшего масштаба и близкими к нам. Очевидно, такое изменение интерпретации было вызвано стремлением дать наблюдательное основание для небулярной гипотезы происхождения солнечной системы.

Приводим перевод соответствующего места из третьего издания (1808 г.) «Изложения системы мира» Лапласа.

«Представляется, что эти звезды далеки от того, чтобы быть рассеянными в пространстве на приблизительно одинаковых расстояниях, но собраны в группы, каждая из которых состоит из нескольких миллиардов звезд. Наше Солнце и наиболее яркие звезды входят, вероятно, в одну из таких групп, которая, если смотреть из точки, где мы находимся, кажется окружающей небо и образующей Млечный путь. Большое число звезд, видимых одновременно в поле зрения сильного телескопа, направленного на этот путь, доказывает нам его огромную глубину, которая в тысячу раз превосходит расстояние от Сириуса до Земли, так что очень правдоподобно, что лучи большинства из этих звезд затратили большое число веков, чтобы дойти до нас. Если еще отдалиться от Млечного пути, он представлялся бы сплошным пятном белого света небольшого диаметра, так как иррадиация, существующая даже в лучших телескопах, перекрыла бы и заставила бы исчезнуть промежутки между звездами. Поэтому вероятно, что большинство туманностей является группами звезд, видимых очень издалека, к которым достаточно было бы приблизиться, чтобы они выглядели подобно Млечному пути. Расстояния между звездами, составляющими группу, по меньшей мере, в 100 000 раз больше, чем расстояние от Солнца до Земли. Таким образом, можно судить о колоссальной протяженности этих групп по бесчисленному множеству звезд, наблюдаемых в Млечном пути. Если подумать затем о малой видимой ширине и о большом числе туманностей, отделенных одна от другой промежутками несравненно большими, чем расстояния между звездами, из которых они состоят, воображению человека, изумленного огромностью вселенной, будет трудно постичь ее границы».

## ИМЕНА, ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ В «ИЗЛОЖЕНИИ СИСТЕМЫ МИРА» П. С. ЛАПЛАСА *

Агриппа, Марк Випсаний, Agrippa (ок. 63—12 до н. э.) — римский полководец и государственный деятель. Известен своими постройками в Риме: водопровод, Пантеон и др.

Александр Македонский, Alexandre le Grand (356—323 до н. э.) — македонский полководец и государственный деятель, создавший огромную империю. Воспитанник Аристотеля.

Аль-Батани (Альбатений), Albatenius (850—929) — арабский астроном и математик. Определил угол наклона эклиптики к экватору, величину прецессии, ввел в употребление тригонометрические функции, составил таблицу синусов.

Аль-Мамун (Альмамон), Almamone (786—833) — арабский халиф. Покровительствовал наукам. Построил в Багдаде астрономическую обсерваторию и пригласил в нее видных астрономов. Приказал измерить длину земного градуса.

Аль-Мансур, Абу Джасаф, Almansor (707—775) — второй халиф династии Аббасидов. Основал Багдад и перенес туда столицу халифата.

Альне-Вахенде, Alne Wahendi (ок. 800) — арабский астроном. Известен определением длины года.

Альфонс X Мудрый, Alphonse X (1221—1284) — король Кастилии и Леона, активно поощрявший астрономию. В 1248 г. он собрал в Толедо около 50 астрономов и поручил им исправить птолемеевы астрономические таблицы. Работа была закончена в 1252 г. Исправленные таблицы называют альфонсовыми.

Анаксагор, Anaxagor (ок. 500—428 до н. э.) — древнегреческий философ, полагавший, что все состоит из первичных телец, различающихся своими качествами. Небесные явления, такие как затмения Солнца и Луны, землетрясения, он старался объяснить естественными причинами, чем навлек на себя обвинение в оскорблении богов, и был изгнан из Афин.

Анаксимандр, Anaximandre (ок. 610—546 до н. э.) — древнегреческий философ и математик. Изобрел солнечные часы, указал на наклонность эклиптики, изготовил небесный глобус.

Анаксимен, Anaximèn (VI в. до н. э.) — древнегреческий философ ионийской школы натурфилософов.

Анна Стюарт, Anne Stuart (1664—1714) — королева Великобритании с 1702 по 1714 гг.

Аполлоний Пергский, Apollonius (ок. 262—180 до н. э.) — древнегреческий математик. Наряду с Архимедом и Евклидом, считается одним из основоположников античной математики. Главное сочинение — о конических сечениях.

Араго, Франсуа Доминик, Arago (1786—1853) — французский астроном и физик. Директор Парижской обсерватории. Изучал поляризацию света, магнитные явления, читал ставшие знаменитыми лекции по астрономии.

Арат, Aratus (315—245 до н. э.) — древнегреческий поэт, астроном и врач. Жил в Александрии при дворе Птолемея Филадельфа. Поэма Арата «Феномены», трактующая о Земле, небесных телах и знамениях, была переведена на латынь Цицероном.

Аристарх Самосский, Aristarque (ок. 310—230 до н. э.) — древнегреческий астроном. Впервые определил расстояние от Земли до Солнца; по-видимому, первый высказал мысль, что Земля вертится вокруг своей оси и вокруг Солнца, и был осужден за эту идею.

Аристилл, Aristille (II в. до н. э.) — древнегреческий астроном. Один из первых наблюдателей Алексадрийской школы.

---

* В скобках приведены встречающиеся иногда другие написания имен, латинскими буквами — транскрипция, принятая Лапласом.

Аристотель, Aristote (384—322 до н. э.) — древнегреческий философ, наставник Александра Македонского. Основой всего он считал материю, но ее развитие приписывал действию невещественного начала. Основал школу Перипатетиков.

Архимед, Archimède (ок. 287—212 до н. э.) — древнегреческий математик и физик. Открыл закон гидростатики, названный его именем, законы рычага, разработал математические методы определения площадей и объемов и вычисления длины кривых. Убит римлянами в Сиракузах.

Барроу, Исаак, Barrow (1630—1677) — английский математик. Учитель Ньютона.

Байи, Жан Сильвен, Bailli (1736—1793) — французский астроном, историк астрономии и политический деятель.

Бернулли, Иоганн, Bernoulli, Jean (1667—1748) — швейцарский математик. Известен работами в области исчисления бесконечно малых и вариационного исчисления.

Бернулли, Даниил, Bernoulli, Daniel (1700—1782) — швейцарский математик, работал в России, член Петербургской Академии наук. Разрабатывал законы механики жидких и газообразных тел.

Бертолле, Клод Луи, Berthollet (1748—1822) — французский химик. Разрабатывал химическую номенклатуру. Много сделал в области практического применения химии.

Био, Жан Батист, Biot (1774—1862) — французский астроном, математик, физик и химик.

Борда, Шарль, Borda (1733—1799) — французский ученый математик и мореплаватель. Участник измерения дуги меридиана, предпринятого для установления метрической системы мира.

Бошан, Жозеф, Beauchamp (1752—1801) — французский ученый, путешественник по Востоку. Сообщил множество интересных сведений о восточных народах и их истории.

Браге, Тихо, Brahé (1546—1601) — датский астроном, учитель Кеплера. Великолепный наблюдатель, сделавший в построенной им обсерватории «Уранибург» огромное количество астрономических наблюдений, позволивших Кеплеру открыть законы движения планет.

Брадлей (Брадли), Джемс, Bradley (1693—1762) — английский астроном, директор Гринвичской обсерватории. В 1727 г. открыл аберрацию света и в 1747 г. нутацию земной оси.

Брисбейн, Томас, Brisbane (1773—1860) — английский военный и астроном. Его именем назван город в Австралии. Основал обсерваторию близ Сиднея.

Бувар, Алексис, Bouvard (1767—1843) — французский астроном. Открыл 8 комет, наблюдал возмущения в движении Урана. Сделал огромное число вычислений для Лапласа.

Бугер, Пьер, Bouguer (1698—1758) — французский гидрограф и математик, основатель фотометрии.

Буркхардт, Иоганн Карл, Burckhardt (1773—1825) — родился в Лейпциге, принял французское подданство. Член Бюро долгот. Составил таблицы Луны и Солнца. Определил массу Венеры и Марса.

Бюрг, Иоганн Товий, Bürg (1766—1834) — австрийский астроном. Изучал движение Луны и его неравенства. Составил лунные таблицы.

Бюрги, Иост, Byrge (1552—1632) — швейцарский математик и астроном. Независимо от Непера составил таблицы логарифмов. Работал в Кассельской обсерватории.

Бюффон, Жорж Луи Леклерк, Buffon (1707—1788) — французский натуралист и писатель, автор многотомной «Естественной истории».

Вальтер, Бернгард, Walterus (1430—1504) — немецкий астроном, ученик Региомонтана.

Варгентин, Пер Вильгельм, Vargentin (1717—1783) — шведский астроном, занимался небесной механикой, вычислил орбиты и неравенства движения спутников Юпитера.

Вильгельм III Оранский, Guillaume III (1650—1702) — с 1672 г. правитель Нидерландов, с 1689 г. английский король.

Волластон, Вильям Хайд, Wollaston (1766—1828) — Английский физик, известен изучением прохождения света в кристаллах с двойным лучепреломлением.

Галилей, Галилео, Galilée (1564—1642) — итальянский астроном, физик и механик. Открыл законы качания маятника. Первым применил телескоп в астрономии, открыл 4 спутника Юпитера, фазы Венеры, горы на Луне. Предложил способ определения долготы места по наблюдениям затмений спутников Юпитера. Изучал законы движения и падения тел. Защищал гелиоцентрическую систему Коперника.

Галлей, Эдмунд, Halley (1656—1742) — английский астроном. Открыл периодичность появления кометы, названной его именем, и предсказал ее новое появление, открыл собственные движения звезд.

Гарун аль-Рашид (Харур ал-Рашид), Aaron-al-Reshide (763—809) — арабский халиф из династии Аббасидов.

Гевелий, Ян, Hévélius (1611—1687) — польский астроном. Построил в Гданьске обсерваторию, составил карты Луны, каталог звездных положений, наблюдал кометы.

Гей-Люссак, Жозеф Луи, Gay-Lussac (1778—1850) — французский физик и химик. Открыл закон теплового расширения газов, закон их объемных отношений, участвовал в основании объемного анализа.

Гершель, Вильям, Herschel (1738—1822) — английский астроном (родом из Германии). Основатель звездной астрономии. С помощью зеркальных телескопов сделал четыре обозрения неба. В 1781 г. открыл планету Уран, два его спутника и два спутника Сатурна. Исследовал множество туманностей, звездных скоплений, двойных звезд.

Гиппарх, Hipparque (II в. до н. э.) — древнегреческий астроном. Составил таблицы движения Солнца и Луны, основанные на теории эпициклов, разделил звезды, видимые простым глазом, па 6 классов по яркости и составил их каталог. Ввел географическое определение места по широте и долготе, взяв за первый меридиан тот, который проходит через остров Родос, открыл явление прецессии.

Гобиль, Антуан, Gaubil (1689—1759) — французский ученый, иезуит, миссионер в Китае.

Го Шоуцзин. Co-cheou-king (ок. 1280) — китайский ученый, астроном. Императором Хубилаем был назначен главой математической коллегии.

Грэхем, Джордж, Graham (1673—1751) — известный английский механик и часовщик.

Гук, Роберт, Hooke (1635—1703) — английский физик, астроном, натуралист и изобретатель. Открыл закон упругости, усовершенствовал зеркальный телескоп.

Гюйгенс, Христиан, Huyghens (1629—1695) — астроном, физик, математик и механик. Родился в Голландии. Работал во Франции. Создал волновую теорию света, усовершенствовал астрономическую трубу, открыл кольца Сатурна. Изучал колебания маятника. Построил маятниковые часы.

Даламбер, Жан, D'Alembert (1717—1783) — французский математик и философ, один из издателей «Энциклопедии». «Принцип Даламбера» является одним из основных в динамике. Даламбер обосновал теорию возмущения планет, нутацию земной оси и предварение равноденствий. Основная философская работа Даламбера «Элементы философии» опубликована в 1759 г.

Дамуазо, Мари Шарль Теодор, Damoiseau (1768—1846) — французский астроном. Развил созданную Лапласом теорию движения Луны.

Декарт, Рене (Картезий), Descartes (Cartesius) (1596—1650) — французский философ, математик, физик и физиолог. С 1629 по 1649 гг. работал в Голландии, потом в Швеции. Основатель Картезианской философской школы. Был дуалистом, противопоставляя сознание и материю, как два независимых начала. Издав в 1637 г. свою «Геометрию», положил начало аналитической геометрии.

Деламбр, Жан Батист, Delambre (1749—1822) — французский астроном и геодезист, участник измерения дуги меридиана, автор таблиц для вычисления движения Солнца и планет. Написал историю астрономии.

Деметрий Полиоркет, Demetrius (337—283 до н. э.) — древнегреческий полководец, подчинивший своей власти почти всю Грецию.

Дион Кассий, Dion Cassius (ок. 155—285) — древнеримский историк.

Дэнторн, Ричард, Dunthorne (1711—1775) — английский астроном. Работал в Кембридже, участвовал в издании «Nautical Almanac».

Евдокс Книдский, Eudoxe (409—356 до н. э.) — древнегреческий астроном. Изобретатель горизонтального солнечного квадранта.

Евклид (Эвклид) Александрийский, Euclide (323—283 до н. э.) — древнегреческий математик. По приглашению Птолемея основал школу математики. Основное его сочинение «Элементы геометрии» — первая попытка систематического изложения всей геометрии дедуктивным способом исходя из твердо установленных аксиом.

Жюрен, Джеймс, Jurin (1684—1750) — английский врач и естествоиспытатель. Известен исследованием капиллярности («закон Жюрена»).

Ибн-Юнус (Эбн-Юнус), Ebn-Iounis (конец X—начало XI в.) — арабский астроном. Известен составлением хакимитских таблиц движения Солнца, Луны и планет.

Кавальери, Бонавентура, Cavalleri (1598—1647) — итальянский математик, ученик Галилея. Предложил особый способ вычисления площадей и объемов.

Кавендиш, Генри, Cavendish (1731—1810) — английский физик и химик. Определил состав воды и воздуха. С помощью крутильных весов определил среднюю плотность Земли, ее массу, силу всемирного тяготения.

Калипп из Сиракуз, Calippe (IV в. до н. э.) — древнегреческий астроном. Для исчисления времени ввел период, связанный с лунными фазами.

Калисфен, Callisthèn (ок. 370—327 до н. э.) — древнегреческий историк.

Карлини, Франческо, Carlini (1783—1862) — итальянский астроном. На основании теории лунного движения составил лунные таблицы, за которые получил премию Парижской Академии наук.

Кассини, Доминико Джованни, Cassini (1625—1712) — астроном, первый директор Парижской обсерватории. Родился в Италии. Сделал первое определение параллакса Солнца (вместе с Рише), обнаружил так называемую щель Кассини в кольце Сатурна.

Кеплер, Иоганн, Kepler (1571—1630) — немецкий астроном, математик и натурфилософ. Путем обобщения наблюдений Тихо Браге и своих вывел законы движения планет, являющиеся теперь основой теоретической астрономии. Вплотную подошел к открытию принципа всемирного тяготения.

Клеомед, Cleomede (конец I в. до н. э.—начало I в. н. э.) — древнегреческий астроном.

Клеро, Алексис Клод, Clairaut (1713—1765) — французский математик. Занимался теорией движения Луны, фигурой Земли и теорией дифференциальных уравнений.

Кольбер, Жан Батист, Colbert (1619—1683) — французский государственный деятель. Покровительствовал наукам и искусствам. Содействовал основанию в Париже трех Академий: Академии надписей и литературы, Академии наук и Академии художеств.

Коперник, Николай, Copernic (1473—1543) — польский астроном, врач и математик. Обосновал гелиоцентрическое движение тел солнечной системы и вращение Земли. Созданную им гелиоцентрическую систему изложил в книге «Об обра-

щении небесных тел», изданной в 1543 г. Его работа в корне преобразовала астрономию.

Коссен, Никола, Cossin (1583—1651) — французский иезуит. Переводчик с арабского языка.

Кулон, Шарль Огюстен, Coulomb (1736—1806) — французский физик. Открыл законы взаимодействия электрических зарядов и полюсов магнита. Изобрел крутильные весы.

Кювье, Жорж, Cuvier (1769—1832) — французский ученый, зоолог и палеонтолог. Основатель сравнительной анатомии.

Лагранж, Жозеф Луи, Lagrange (1736—1813) — французский математик и механик. Работы по теории либрации Луны, теории Юпитера и его спутников прославили его как астронома. Главные труды по математике — «Аналитическая механика», теория аналитических функций и работы в области дифференциального и интегрального исчисления.

Лаир, Филипп, La Hire (1640—1718) — французский астроном, геометр, физик, натуралист и художник. В астрономии известен как прекрасный наблюдатель. В 1678 г. объединился с Пикаром для составления карты Франции. Его «Гномоника» была издана в 1698 г.

Лакайль, Никола Луи, Lacaille (1713—1762) — французский астроном. Организовал астрономическую экспедицию на мыс Доброй Надежды, где выполнил огромное число наблюдений звезд. Его основные работы «Основы астрономии», «Солнечные таблицы» и «Каталог южных звезд».

Ла Кондамин, Шарль Мари, La Condamine (1701—1774) — французский математик и литератор. Принимал участие в экспедиции на экватор для измерения градуса меридиана.

Лаланд, Жозеф, Lalande (1732—1807) — французский астроном. С 1768 г. директор Парижской обсерватории. Занимался теорией планет, особенно Меркурия, и комет. Определил параллакс Луны. Написал курс астрономии.

Ламберт, Иоганн Генрих, Lambert (1728—1777) — немецкий физик и астроном. Занимался оптикой, фотометрией. Написал трактат о кометах, дал эмпирические формулы для исправления таблиц Юпитера и Сатурна.

Лежандр, Адриен Мари, Legendre (1752—1833) — французский математик. Много занимался астрономией и геодезией. Участвовал в геодезической связи Парижской и Гринвичской обсерваторий. Описание этих работ изложено им в «Мемуарах о тригонометрических операциях, результаты которых зависят от фигуры Земли». После Лагранжа был директором Бюро долгот. Участвовал в разработке метрической системы мер.

Лейбниц, Готфрид Вильгельм, Leibniz (1646—1716) — немецкий математик и философ-идеалист. Один из создателей исчисления бесконечно малых.

Лексель, Андрей Иванович, Lexel (1740—1784) — русский математик, известный работами по сферической геометрии. Исследовал орбиту кометы 1770 г.

Лемонье, Пьер Шарль, Lemonnier (1715—1799) — французский астроном. Участвовал в полярной экспедиции Мопертюи.

Лефевр-Жино, Луи, Le Fèvre-Gineau (1754—1829) — французский математик и физик. Участник комиссии по введению метрической системы мер.

Людовик XIV, Louis XIV (1638—1715) — французский король.

Майер, Тобиас, Mayer (1703—1762) — немецкий ученый, астроном, профессор математики и астрономии в Геттингене. Обосновал теорию пассажного инструмента. Изобрел повторительные инструменты. Исследовал движение Луны и дал ее теорию. Составил лунные таблицы.

Маклорен, Колин, Mac-Laurin (1698—1746) — английский математик. Один из последователей Ньютона. Алгебраист и геометр.

Макробий, Амброзий Тезий, Macrobe (V в. н. э.) — римский ученый, философ, филолог и политический деятель.

Малю, Этьен Луи, Malus (1775—1812) — французский физик. Написал трактат по аналитической оптике. Занимался исследованием преломления света, в частности двойным лучепреломлением в кристаллах.

Мальбранш, Никола, Malebranche (1638—1715) — французский философ-идеалист.

Маральди, Джакомо Филиппо, Maraldi (1665—1729) — итальянский астроном. Принимал участие в триангуляции от Амьена до Дюнкерка и в измерении дуги меридиана. Вел астрономические наблюдения для каталога звезд.

Мариа, Доминико, Maria (ок. 1500) — итальянский профессор в Болонье, у которого учился Коперник.

Маскелайн, Невил, Maskelyne (1732—1811) — английский астроном-наблюдатель. Усовершенствовал астрономические инструменты. Основал издание «Nautical Almanac» (1767 г.). По наблюдениям притяжения отвеса горою Шихаллион, определил среднюю плотность Земли.

Матье, Шарль Луи, Mathieu (1783—1875) — французский астроном. Работал в Бюро долгот, участвовал в опытах Био с секундными маятниками на Средиземном море.

Мейсон, Чарльз, Mason (1730—1787) — английский астроном, работал в Гринвичской обсерватории. Измерил дугу меридиана в США.

Менелай Александрийский, Ménélaus (I в. н. э.) — астроном Александрийской школы.

Меркатор (Крамер), Гергард, Mercator (1512—1594) — голландский картограф. Родился во Фландрии. Издавал карты и атласы. Автор нескольких картографических проекций, в частности равноугольной цилиндрической проекции, названной его именем и применяемой для навигационных карт.

Местлин, Михель, Maestlin (1550—1631) — немецкий ученый, учитель Кеплера.

Метон, Meton (ок. 460 г. до н. э.) — древнегреческий астроном. Нашел лунный цикл в 19 лет.

Митчелл, Джон, Mitchell (1724—1793) — английский астроном. Придумал метод определения плотности Земли, использованный Кавендишем.

Михаил III, Michel III (842—867 — годы правления) — византийский император.

Монтень, Мишель, Montaigne (1533—1592) — французский философ и писатель. Основное произведение — три тома «Опытов» (1580).

Мопертюи, Пьер Луи, Maupertuis (1698—1759) — французский математик и астроном. Руководил измерением дуги меридиана в Лапландии. Сформулировал принцип наименьшего действия в механике.

Набонассар, Nabonassar (747—734 до н. э. — годы правления) — халдейский царь.

Насирэддин, Туси Мухаммед, Nassir-eddin (1201—1274) — персидский астроном и математик. Построил обсерваторию, в которой производились весьма точные наблюдения. Составил на их основании звездный каталог. Изложил сферическую тригонометрию.

Непер, Джон, Neper (1550—1617) — шотландский математик, изобретатель логарифмов.

Николе, Жозеф, Nicollet (1786—1843) — французский математик. Занимался изучением движения Луны.

Нисетас Сиракузский, Nicetas (V в. до н. э.) — древнегреческий философ-пифагореец. Считал, что Земля находится в движении, а небо, Солнце и Луна — неподвижны.

Ньютон, Исаак, Newton (1643—1727) — английский физик, механик, астроном и математик. Его работа «Математические начала натуральной философии», появившаяся в 1687 г., совершила переворот в науке. В ней изложен принцип всемирного тяготения.

Ольберс, Генрих Вильгельм, Olbers (1758—1840) — немецкий астроном. Много занимался изучением комет. Усовершенствовал методы вычисления их орбит.

Пембертон, Генри, Pemberton (1694—1771) — английский врач. Друг Ньютона и издатель его трудов.

Папп Александрийский, Pappus (конец III — начало IV в.) — греческий геометр. Известен своими комментариями к «Альмагесту» Птолемея и «Элементам» Евклида; автор «Собрания» — изложения математических сведений того времени (главным образом по геометрии).

Пенгре, Александр Ги, Pingré (1711—1796) — французский астроном. Автор «Кометографии», изданной в 1783 г. Участник экспедиции 1761 г. на остров Родригес для наблюдения прохождения Венеры по диску Солнца.

Перикл, Périclès (ок. 490—429 до н. э.) — древнегреческий государственный и политический деятель.

Пиацци, Джузеппе, Piazzi (1746—1826) — итальянский астроном. Открыл планету Цереру. Составил каталог 7500 звезд.

Пикар, Жан, Picard (1620—1682) — французский астроном. Один из основателей Парижской обсерватории. Определил величину земного радиуса.

Пифагор, Pythagore (580—500 до н. э.) — древнегреческий философ и математик. Основатель философской школы.

Пифей (Пифеас), Pythéas (IV в. до н. э.) — древнегреческий астроном и мореплаватель. Производил измерения тени гномона.

Плана, Джованни Антонио Амедео, Plana (1781—1864) — итальянский астроном. Вместе с Карлини в 1820—1823 гг. участвовал в геодезических работах по измерению дуги параллели между Бордо и Фиуме. Написал «Теорию движения Луны».

Платон (Аристокл), Platon (427—347 до н. э.) — древнегреческий философ-идеалист, основатель философской школы. Излагал свои мысли в форме диалогов.

Плиний старший, Pline le naturaliste (23—79) — древнеримский писатель и ученый. До нас дошла его «Естественная история», где излагается, в частности, астрономия и физика того времени.

Плутарх из Херонеи, Plutarque (ок. 46—126) — древнегреческий писатель и философ. Автор «Сравнительных жизнеописаний».

Порфир(ий) (Малкус), Porphyre (ок. 232—304) — древнегреческий философ. Известен как толкователь и систематизатор логики Аристотеля.

Посидоний, Possidonius (ок. 135—50 до н. э.) — греческий философ, историк, математик и астроном. Учитель Цицерона.

Птолемей, Клавдий, Ptolémée (II в.) — древнегреческий астроном, географ и картограф. Работал в Александрии. Его главное произведение «Альмагест» включает теорию геоцентрического движения Солнца и планет по эпициклам, а также планетные таблицы и звездный каталог.

Птолемей Сотер, Ptolémée Soter (ок. 367—283 до н. э.) — македонский военачальник, правитель Египта, основатель библиотеки в Александрии.

Птолемей Филадельф, Ptolémée Philadelphe (309—246 до н. э.) — сын Птолемея Сотера, правитель Египта.

Пуассон, Симон Дени, Poisson (1781—1840) — французский математик, механик и физик. Автор многочисленных трудов по математике, теоретической и небесной механике, по физике и теории упругости.

Пурбах (Пейербах), Георг, Purbach (Peurbach) (1423—1461) — австрийский математик. Обработал «Альмагест», составил таблицы движения планет и каталог звезд. Написал «Новую теорию планет». Известен работами по тригонометрии.

Рамон, Луи Франсуа, Ramond (1753—1327) — французский физик. Занимался исследованием атмосферы. Определил барометрический коэффициент.

Региомонтан (Мюллер, Иоганн), Regiomontanus (1436—1476) — немецкий астроном и математик из Кенигсберга во Франконии, ученик Пурбаха. Перевел «Альмагест», а также множество математических и астрономических работ с греческого на латинский язык. Работал в Нюрнбергской обсерватории, где наблюдал небесные светила с помощью им самим изготовленных инструментов.

Рёмер, Оле, Roëmer (1644—1710) — датский астроном. Работал с Пикаром и Кассини. Определил скорость света по затмениям спутников Юпитера. Ввел в Дании григорианский календарь.

Рен, Кристофер, Wren (1632—1723) — английский архитектор и естествоиспытатель. Преподавал астрономию в Лондоне и в Оксфорде.

Ретик, Иоахим Георг, Rethicus (1514—1576) — немецкий астроном, последователь Коперника. По его настоянию Коперник согласился напечатать свой труд «Об обращении небесных тел». Ретик посвятил свою жизнь составлению тригонометрических таблиц, которые были изданы уже после его смерти, в 1596 г.

Рихтер, Иеремия Веньямин, Richter (1762—1809) — немецкий химик и геолог.

Рише, Жан, Richer (?—1696) — французский астроном. В 1671 г. из совместных с Кассини наблюдений Солнца и Марса определил параллаксы этих светил. (Рише наблюдал в Кайенне, Кассини — в Париже). Первым указал на изменение длины секундного маятника в зависимости от величины силы тяжести.

Ротман, Кристоф, Rothman (1550—1605) — придворный математик при ландграфе Вильгельме IV Гессенском. Установил, что по наблюдениям Луны можно определять долготы.

Рудольф II, Rodolphe II (1552—1612) — император «Священной Римской империи».

Руйе де Меле, Rouillé de Meslay (ок. 1700) — советник французского парламента.

Рюмкер, Карл Людвиг Кристиан, Rümker (1788—1862) — немецкий астроном. В 1822 г. в Новой Голландии наблюдал возвращение кометы Энке. Составил каталог 12 000 звезд.

Сванберг, Енс, Svanberg (1771—1851) — шведский математик и астроном. В 1801—1803 гг. вновь измерил длину градуса в Лапландии, так как величина, полученная ранее Мопертюи, оказалась противоречащей всем другим результатам. Сванберг нашел в измерениях Мопертюи ошибку и получил правильный результат.

Сегнер, Янош Андраш, Segner (1704—1777) — венгерский ученый, математик, астроном, физик.

Сенека, Луций Анней, Sénèque (ок. 4 г. до н. э.—65 н. э.) — римский философ, политический деятель и писатель. Наиболее известные литературные произведения: трагедии «Федра» и «Медея».

Симплициус, Simplicius (V в.) — философ и богослов. Римский папа с 468 по 483 гг.

Снеллиус, Виллеброрд, Snellius (1580—1626) — голландский математик. Ему приписывают открытие законов преломления света. Определил длину градуса меридиана в Голландии.

Созиген Александрийский, Sosygène (I в. до н. э.) — древнегреческий астроном. По распоряжению Юлия Цезаря реформировал римский календарь.

Соссюр, Орас Бенедикт, Saussure (1740—1799) — швейцарский естествоиспытатель, географ и геолог. Изучал атмосферу. Изобрел гигрометр, электрометр и другие приборы.

Страбон, Strabon (ок. 63 до н. э.—20 н. э.) — древнегреческий географ и историк. Автор «Географии».

Сулла, Луций Корнелий, Sylla (138—78 до н. э.) — римский диктатор.

Тимохарис, Timocharis (IV—III в. до н. э.) — древнегреческий астроном. Вместе с Аристиллом составил звездный каталог.

Тихо Браге — см. Браге.

У Ван, Ou-Ouang (ок. 1100 до н. э.) — правитель Китая. Основатель династии Чжоу.

Улугбек, Мухаммед Тарагай, Ulugh-Beigh (1394—1449) — узбекский астроном, правитель Самарканда. Построил обсерваторию с огромными инструментами. Составил самый точный для своего времени каталог звезд.

Уаллис, Джон, Wallis (1616—1703) — английский математик.

Фалес Милетский, Thalès (ок. 624—547 до н. э.) — древнегреческий философ, математик, физик, астроном.

Феон из Смирны, Theon (II в. до н. э.) — древнегреческий философ и математик.

Ферма, Пьер, Fermat (1601—1665) — французский математик. Известен как один из создателей аналитической геометрии, а также своими работами по теории чисел. В области исчисления бесконечно малых является ближайшим предшественником Лейбница и Ньютона. Заложил основы теории вероятностей.

Филолай, Philolaüs (V в. до н. э.) — итальянский философ. Ученик Пифагора, впервые записавший его учение.

Флемстид, Джон, Flamsteed (1646—1719) — английский астроном. Вычислил таблицы приливов. Участвовал в международной комиссии по определению долгот по лунным расстояниям. Основал Гринвичскую обсерваторию и был ее первым директором — королевским астрономом.

Фридрих II, Frédéric II (1194—1250) — император «Священной Римской империи», король Сицилии.

Фридрих Датский, Frédéric (1534—1588) — король Дании.

Фурье, Жан Батист Жозеф, Fourier (1768—1830) — французский математик и физик. Автор работ по теории тригонометрических рядов и дифференциальных уравнений. Разработал математические основы теории теплоты. Одна из главных работ — «О вековом охлаждении Земли».

Хакем (Хаким), Hakem (985—1021) — египетский халиф.

Хаям, Омар Айам, Omar-Cheyan (ок. 1040—1123) — персидский поэт и ученый, математик и астроном.

Хардинг, Карл Людвиг, Harding (1765—1834) — немецкий астроном, директор Геттингенской обсерватории.

Хубилай, Cobilai (1214—1294) — монгольский великий хан, завоеватель Китая и китайский император, основатель Юаньской династии в Китае.

Хулагу, Holagu-Ilecoukan (1217—1265) — монгольский правитель.

Цезарь, Гай Юлий, Jules Cesar (100—44 до н. э.) — римский диктатор, полководец, писатель.

Цзу Чунчжи, Tsou-Tchong (428—500) — китайский астроном. С большой точностью вычислил продолжительность тропического года.

Цинь Шихуанди (Ин Чжэн), Chinoanti (259—210 до н. э.) — основатель и правитель царства Цинь. Задумал создать «Великую стену». Ему приписывают уничтожение всей конфуцианской литературы и истребление ученых.

Цицерон, Марк Туллий, Ciceron (106—43 до н. э.) — древнеримский оратор, писатель и политический деятель.

Чжоу Гун, Tcheoukong (ок. 1100 до н. э.) — китайский астроном, брат У Вана, основателя династии Чжоу. Управлял Китаем с 1104 по 1098 гг. до н. э.

Шрётер, Иоган Иероним, Schroeter (1745—1816) — немецкий астроном-любитель. Построил обсерваторию близ Бремена. Его основной труд — два тома «Очерков лунной топографии».

Эвктемон, Euctémon (V в. до н. э.) — древнегреческий астроном. Вместе с Метоном в 432 г. до н. э. наблюдал летнее солнцестояние.

Эйлер, Леонард, Euler (1707—1788) — математик, физик и астроном. Родился в Швейцарии. В 1727—1741 и 1766—1783 гг. работал в России. Член Петербургской и Берлинской академий наук. Написал множество научных работ по аналитической механике, арифметике, о приливах и отливах морей и др.

Энке, Иоганн Франц, Encke (1791—1865) — немецкий астроном. Обучался под руководством Гуасса. Впервые определил элементы орбиты кометы, открытой Понсом в ноябре 1818 г. Эта периодическая комета получила название кометы Энке.

Эратосфен Киренский, Eratosphène (ок. 275—195 до н. э.) — древнегреческий математик, астроном и географ. Ему приписывается первое определение размеров Земли.

**Юнг**, Томас, Young (1773—1829) — английский ученый, физик, по образованию врач. Занимался изучением интерференции и дифракции света, изучал человеческое зрение, установил законы интерференции света, для определения упругости материалов предложил модуль, получивший название модуля Юнга.

**Яо**, Yao (2356—2258 до н. э.) — один из великих императоров легендарного периода истории Китая, отличавшийся мудростью. Впервые установил систему счисления времени.

## ЛАПЛАС И ЕГО ВКЛАД В РАЗВИТИЕ АСТРОНОМИИ

Пьер Симон Лаплас жил и работал в то тревожное для Франции время, когда страна переживала ряд важных политических преобразований. Феодальный абсолютизм, установившийся при правлении Генриха IV и Людовиков XIII и XIV, был уничтожен буржуазной революцией 1789—1794. Его сменила провозглашенная Конвентом республика, затем диктатура якобинцев, Директория, военная диктатура Наполеона Бонапарта и после его разгрома русскими войсками снова монархия, возглавляемая Бурбонами. На фоне таких политических событий Лаплас создавал свои труды.

Пьер Симон Лаплас родился 23 марта 1749 г. в Нормандии, в Бомоне на Оже (Beaumont-en-Auge) в семье фермера.

Свои школьные годы Пьер-Симон провел в Бомоне, где учился в бенедектинском коллеже конгрегации св. Мора. Там давалось в основном светское образование. Лаплас проявил блестящие способности к литературе и богословию. Литературу он любил всю жизнь, особенно Расина, ставшего его любимым поэтом, стихи которого он ценил наравне с открытиями Ньютона и часто читал наизусть отрывки из его трагедий. Юный Лаплас вначале предполагал посвятить себя церкви и в молодости отличался в теологических спорах, чем обратил на себя внимание некоторых влиятельных лиц, которым он обязан своим воспитанием. По воспоминаниям людей, близко знавших Лапласа, он и в зрелые годы в домашней обстановке любил поспорить о религии. Однако, по всей вероятности, Лаплас не был верующим человеком. Во всяком случае, в его научных трудах нельзя найти и следов религиозного мировоззрения. Зато в них неоднократно упоминаются «заблуждения и предрассудки», сковывающие человеческий разум.

Окончив коллеж, Лаплас некоторое время учился и одновременно преподавал в военной школе в Бомоне, а затем поступил в университет в городе Кане (Caen), чтобы подготовиться к карьере священника. Там он изучил философию. Но вскоре один из преподавателей университета Каню (Canu) открыл в нем необыкновенные математические способности и направил его в Париж, снабдив рекомендательным письмом к Даламберу, бывшему тогда на вершине своей славы и влияния. Даламбер не принял молодого провинциала и несколько раз уклонялся от встречи с ним. Но когда Лаплас снова пришел к нему, принеся вместо рекомендаций свою работу по высшей математике, великий ученый был восхищен. Вскоре он выхлопотал Лапласу место преподавателя в Королевской военной школе в Париже и открыл ему доступ в Академию наук. Для двадцатилетнего честолюбивого юноши начались годы напряженной работы. Последующее двадцатилетие было самым плодотворным в его научной деятельности.




**Пьер Симон Лаплас.**

Гравюра на меди Тони Гутьера.

* * *

Лаплас был человеком скрытным. О его детстве и юности известно очень немного. О них он не любил рассказывать и ничего не написал. Биографы Лапласа объясняют это тем, что прославленный ученый, ставший к тому же аристократом и сановником, стыдился своего происхождения и бедности, которую ему пришлось испытать смолоду. Высказывались даже предположения, что происхождение и юность Лапласа связаны, быть может, с какой-то тайной. Уехав в Париж, Лаплас прервал отношения со своими провинциальными родственниками, не виделся с ними до самой смерти и, по-видимому, ни разу не побывал на родине. Лаплас не любил говорить и писать о себе, о своих мыслях и чувствах; он не оставил мемуаров, а в своей переписке с учеными касался только научных вопросов. Он жил в бурное время, режимы и правительства менялись неоднократно, а Лаплас всегда был в фаворе. Наверное, скрытность все же была постоянной чертой его характера.

Двадцатилетний Лаплас приехал в Париж блестяще и разносторонне образованным человеком, знакомым с трудами передовых философов своего времени, владеющим самыми современными математическими методами — вот все, что известно о нем. Руководил ли кто-нибудь специально образованием Лапласа или он был всем обязан только себе, своим способностям, энергии и любознательности — неизвестно.

Получив место преподавателя в Парижской военной школе, Лаплас отдал все свое время науке, он направил свои усилия по пути, от которого уже никогда не отклонялся, так как нерушимое постоянство в выполнении задуманного всегда было характерной чертой его гения. Он посвятил себя астрономии и решил все в ней улучшить и уточнить. Вся его жизнь, посвященная этой грандиозной задаче, являет пример настойчивости и целеустремленности.

* * *

Труды Галилея, Гюйгенса, Ньютона дали мощный толчок развитию механики. Математический анализ, разработанный Лейбницем и Ньютоном, которые создали основы дифференциального и интегрального исчислений, бесконечно расширил возможность научного изучения природы.

Законы эллиптического движения планет были открыты Кеплером. Ньютон объяснил их исходя из сформулированного им принципа всемирного тяготения. Ничего не зная о природе силы тяготения (она, по сути дела, не известна и сейчас), Ньютон, основываясь на законах тяготения, создал математическую теорию, связавшую воедино движения планет, их спутников, комет, падение тел и явление морских приливов. Он создал понятие возмущающей силы третьего тела, изменяющей движения двух взаимно притягивающихся тел, объяснил неравенства лунного движения — эвекцию, вариацию и годичное уравнение. Исходя из своей теории, Ньютон предположил, что Земля должна быть сжата у полюсов, и пока-

зал, что предварение равноденствий, известное еще с древности, должно быть следствием этого сжатия. Он создал также первую научную теорию приливов, происходящих в результате притяжения водной массы Луной и Солнцем.

Наука в XVIII в. быстро развивалась, причем наиболее впечатляющими были успехи астрономии и небесной механики. Закон всемирного тяготения дал незыблемую основу для изучения движений небесных тел и послужил стимулом для бурного развития новых разделов математики. Славная плеяда ученых — младших современников Ньютона и живших после него — продолжала работать над проблемами, поставленными его теорией. Измерения градусов меридиана на разных широтах подтвердили мысль Ньютона о том, что Земля сжата у полюсов; об этом же говорили и закономерные изменения силы тяжести, определенной в различных точках земной поверхности из наблюдения качающихся маятников. Были разработаны способы расчета орбит комет и предсказания времени их возвращения к Солнцу. «Своевременное» появление кометы Галлея, предсказанное расчетами его и Клеро, произвело на современников не меньшее впечатление, чем в древности солнечные и лунные затмения, предсказанные античными астрономами. В честь Галлея, кометы названной его именем, и Клеро слагались песни и оды. Многие задачи небесной механики были разрешены в трудах Эйлера, Клеро, Даламбера, Лагранжа и других математиков, причем ими же параллельно создавался математический аппарат, необходимый для решения этих задач. К середине XVIII в. у многих ученых окрепло убеждение, что сложность движения тел в солнечной системе зависит только от их многочисленности, а закон, управляющий ими, — один: все скрыто в формуле всемирного тяготения. Если какое-либо явление не подчиняется принципу всемирного тяготения или противоречит ему, значит, допущены ошибки в наблюдениях или наблюдения неверно истолкованы. Но это надо было еще доказать.

В континентальной Европе, особенно во Франции, теории Ньютона пришлось поначалу преодолевать влияние картезианства. Но во времена, к которым относится начало научной деятельности Лапласа, учение Ньютона уже получило всеобщее признание и во Франции. Лаплас с самого начала стал убежденным последователем и продолжателем Ньютона. Его даже называли «Французским Ньютоном».

* * *

Напряженно и продуктивно работая в Париже, Лаплас одну за другой представляет в Академию наук статьи по «чистой» и прикладной математике, по математической физике и проблемам небесной механики. Он возвращается к задачам, решенным его предшественниками неточно или с недостаточной полнотой, и ставит и решает новые задачи. В лаборатории Лавуазье Лаплас занимается физикой. По-видимому, это был первый и последний случай, когда Лаплас непосредственно столкнулся с физическим экспериментом по изучению теплоты и электричества

(к математической физике он вернется еще раз во второй половине своей жизни). Некоторые из математических методов, предложенных Лапласом, применяются до сих пор и носят его имя. Весьма велик его вклад в разработку теории вероятностей, которую он пытался применить не только к научным наблюдениям и опытам, но и к событиям гражданской и политической жизни. Но делом всей жизни Лапласа, в котором полностью проявился его колоссальный талант, стала небесная механика.

Нерешенных проблем в небесной механике оставалось немало. Лаплас поставил своей задачей доказать, что законами всемирного тяготения можно объяснить все движения небесных тел, вплоть до самых малых подробностей. Если Лаплас и терпел когда-нибудь неудачи на этом пути, это осталось неизвестным. О своих неудачах он рассказывать не любил, а успехов было множество. Применив более совершенные, чем его предшественники, методы математического анализа, Лаплас разрешил долго тревожившую умы задачу так называемого векового ускорения среднего движения Юпитера и замедления движения Сатурна. Оказалось, что эти эффекты имеют не вековой, а периодический характер и зависят от взаимного притяжения этих планет, определяемого их положением. В других работах Лаплас показал, что элементы движения планет могут лишь колебаться около своей средней величины в некоторых узких пределах. Отсюда вытекало, что все неравенства в движениях планет — периодические и, следовательно, солнечная система устойчива. Земле не грозит опасность упасть на Солнце или отдалиться от него. Устойчивость солнечной системы поддерживается взаимным влиянием ее членов и не требует периодической корректировки извне, как то предполагал Ньютон, а за ним и Эйлер. Славу этого фундаментального вывода с Лапласом делит другой великий математик XVIII в. — Лагранж, пришедший к аналогичному выводу.

* * *

Лагранж и Лаплас были коллегами, неоднократно им случалось работать над одними и теми же проблемами. Они вдохновляли друг друга, но друзьями не были, даже друзьями-соперниками.

* * *

Лаплас разработал теорию движения спутников Юпитера и довел ее до высокой степени точности, так что, наблюдая затмения этих спутников, стало возможным определять долготу места наблюдения, о чем когда-то мечтал Галилей. Необыкновенно простые соотношения между движениями первых трех спутников Юпитера и между их долготами получили в астрономии название «Законов Лапласа». Он показал, что эти соотношения являются следствиями гравитационного взаимодействия между спутниками и что возмущения, которые возникают в этой системе, ею же гасятся. Для Лапласа Юпитер с его спутниками был как бы

уменьшенной копией солнечной системы, в которой действуют те же закономерности, но, благодаря меньшим размерам модели, все события развиваются гораздо быстрее.

* * *

Луна обращается вокруг Земли по эллипсу, то сближаясь с нею, то удаляясь; однако это движение только в первом приближении происходит по законам Кеплера. Солнце и планеты возмущают лунное движение. Элементы движения Земли вокруг Солнца тоже непостоянны — они подвержены возмущениям со стороны других планет и Луны. Все эти изменения движения Земли косвенным образом сказываются на лунном движении. Поэтому движение Луны получается очень сложным, оно подвержено многим неравенствам. Долго не удавалось построить удовлетворительную теорию движения Луны и составить достаточно точные лунные таблицы. И здесь огромная заслуга принадлежит Лапласу.

Вековое ускорение среднего движения Луны, открытое Галлеем, долгое время не находило объяснения. Это ставило под сомнение точность закона Ньютона. Лаплас, однако, установил, что то, что называли вековым ускорением Луны, оказывается не вековым, а периодическим и зависит от периодических изменений эксцентриситета земной орбиты, вызванных возмущающими влияниями других планет. Так как главный источник возмущений лунного движения — Солнце, то по величине возмущений, зависящих от Солнца, Лаплас рассчитал расстояние от Земли до Солнца с такой же точностью, с какой это было вычислено по наблюдениям за прохождениями Венеры по солнечному диску.

Поскольку фигура Земли не является сферической, то в уравнениях, описывающих притяжение Луны Землей, притяжение Земли нельзя просто заменить притяжением материальной точки. В формулы, представляющие движение Луны, должны войти члены, зависящие от величины сжатия Земли. Эту величину Лаплас вычислил по движениям Луны с точностью, близкой к той, с какой она была определена в результате многочисленных экспедиций, предпринятых в отдаленные страны для измерения градуса дуги меридиана. По величине сжатия Лаплас рассчитал упругость вещества, из которого состоит Земля, а также нарастание его плотности с глубиной.

Первые догадки о том, что морские приливы и отливы связаны с движениями Солнца и Луны, восходят к античности. Кеплер дал верную интерпретацию этого явления в той мере, в какой он подошел к пониманию принципа тяготения. Первую научную теорию приливов создал Ньютон. Бернулли, Эйлер, Маклорен, Даламбер развили и уточнили ее. Следующий большой шаг был сделан Лапласом.

В его распоряжении находился обширный материал, собранный за десятилетия непрерывных наблюдений над приливами в Брестском порту и математически обработанный учеником Лапласа Буваром с применением методов теории вероятностей, значительно улучшенных самим Лапласом. Таким материалом прежде никто не располагал. Теория Лапласа

стала самой полной и точно соответствовала наблюдениям. Лаплас создал динамическую теорию приливов, где рассматривались не только вариации силы, с которой водная масса притягивается Солнцем и Луной, но и вынужденные колебания водной массы. Занимаясь теорией приливов, Лаплас имел в виду и практическую пользу, которую могла бы принести такая теория судоводителям и лоцманам.

Невозможно перечислить все, чем небесная механика и ее математический аппарат обязаны Лапласу. Свои результаты, разбросанные в многочисленных статьях и сообщениях (некоторые из них не были опубликованы) он объединил в пятитомном «Трактате о небесной механике» (1799—1825 гг.), в котором подвел итоги всему развитию этой науки до начала XIX в. Но «Трактат» — это не только обзор; в нем Лаплас высказал в завершенной и окончательной форме многие мысли, которые в его статьях были изложены, по его мнению, недостаточно четко.

* * *

В 1773 г. Лаплас был принят в Академию наук адъюнктом (низший ранг в тогдашней королевской Академии), а в 1785 г. стал «пенсионером», т. е. «полным» академиком. В 1788 г. он женился на Шарлотте де Курти. У них было двое детей — сын, впоследствии генерал-артиллерист, и дочь, умершая сравнительно рано. По воспоминаниям друзей Лапласа, в семейной жизни он был счастлив. Госпожа Лаплас была красивая женщина с живым и мягким характером, глубоко уважавшая своего гениального мужа и старавшаяся создать дома условия для его научных занятий. Молодые ученые, с которыми Лаплас охотно общался во второй половине жизни (многие из них потом стали знаменитыми), находили в его доме самый радушный прием, а госпожа Лаплас была их доброй покровительницей.

Лаплас стоял в стороне от революционных событий, разразившихся во Франции в 1789 г. Некоторое время он принимал участие в работе комиссии по установлению новой системы мер и весов, созданной в 1790 г под председательством Лагранжа, но в бурном 1793 г. вместе с Лавуазье был выведен из нее за «недостаток республиканских добродетелей и ненависти к королям». Лавуазье погиб на гильотине, а Лаплас переехал с семьей в городок Мелен, недалеко от Парижа, где было спокойнее. В Мелене Лаплас написал «Изложение системы мира» — популярный очерк небесной механики в традициях французских просветителей, явившийся, по-видимому, прообразом его будущего «Трактата о небесной механике». «Изложение системы мира» вышло в свет в 1796 г. и было переведено на многие европейские языки. Написанная четко и ясно, рукой одного из творцов небесной механики книга без единого чертежа и математического уравнения знакомила читателя с самыми сложными проблемами этой науки. Ее заключали исторический очерк развития астрономии и примечания, в последнем из которых Лаплас представил свою, ставшую впоследствии знаменитой, гипотезу о происхождении солнечной системы.

Осенью 1794 г. Лаплас вернулся в Париж и принял участие в организации Нормальной школы (École normale superieure) — высшего учебного заведения, которое должно было готовить высококвалифицированных преподавателей для школ и высших учебных заведений. Она должна была стать основным звеном в реформе образования, задуманной революционными деятелями Конвента. Франция остро нуждалась в большом количестве образованных людей, а старая система учебных заведений была неудовлетворительной: в ней наука была оторвана от преподавания. В Нормальной школе к преподаванию привлекали крупнейших ученых. Лаплас читал там курс математики. Из учеников Нормальной школы и созданной тогда же с участием Лапласа Политехнической школы вышли прекрасные специалисты и известные ученые, многие из которых были слушателями Лапласа.

В 1795 г. Лаплас был в числе первых членов и организаторов «Бюро долгот» (Bureau des Longitudes) — учреждения, основанного для ежегодного издания астрономических эфемерид — «Connaissance des Temps» и «L'Annuaire du Bureau des Longitudes». Впоследствии он стал его президентом, участвовал в Комиссии мер и весов и помогал установлению десятичной системы. Когда в 1795 г. был основан Институт Франции,* заменивший распущенные в 1793 г. королевские академии, он занял в нем видное место. В этом же году Лаплас возглавил депутацию, представившую Совету пятисот отчет о состоянии наук. Тогда же вышло первое издание «Изложения системы мира» Лапласа, которое он посвятил этому Совету.

После опубликования его «Небесной механики» Лаплас приобрел всемирную известность великого ученого, стал членом английского Королевского общества и вошел в большинство европейских академий.

* * *

Определение географической широты не представляет особых трудностей для наблюдателя, вооруженного соответствующими приборами. Определение долготы значительно сложнее. Нужды мореплавания, географии, картографии настойчиво требовали разрешения этой проблемы. В течение XVIII в. в результате многочисленных экспедиций была определена фигура Земли, были разработаны методы определения долготы по положению Луны на небосводе, по затмениям спутников Юпитера.

---

* Институт (L'Institut de France) объединил пять академий: 1) Французскую Академию, основанную в 1635 г. Ришелье (40 членов) и во времена Лапласа редактировавшую «Энциклопедию»; 2) Академию надписей и литературы, основанную в 1663 г. Кольбером (40 членов); 3) Академию нравственных и политических наук, основанную Конвентом в 1795 г. (40 членов) и изучавшую вопросы философии, политической экономии, права, общей истории и др.; 4) Академию наук, основанную в 1666 г. Кольбером (65 членов) для изучения физики, математики, химии и др.; 5) Академию художеств (40 членов), разные секции которой были основаны Мазарини и Кольбером и объединены вместе в 1795 г. Ее членами были художники, граверы, музыканты, архитекторы.

# EXPOSITION

DU

# SYSTÈME DU MONDE;

**PAR M. LE MARQUIS DE LAPLACE.**

Pair de France; Grand Officier de la Légion d'honneur; l'un des quarante de l'Académie française; de l'Académie des Sciences; Membre du Bureau des Longitudes de France; des Sociétés royales de Londres et de Göttingue; des Académies des Sciences de Russie, de Danemarck, de Suède, de Prusse, des Pays-Bas, d'Italie, etc.

**SIXIÈME ÉDITION.**

---

PARIS,

BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES,

QUAI DES AUGUSTINS, N° 55.

---

1835

**Титульный лист труда П. С. Лапласа «Изложение системы мира», с которого сделан перевод настоящего издания.**

Создание хронометра, позволившего «хранить» в пути точное время пункта, принятого за начальную точку отсчета долгот, открыло перед мореплавателями новые возможности. Были усовершенствованы астрономические навигационные приборы.

Специальным декретом Парижская обсерватория была передана в распоряжение Бюро долгот, на которое была возложена задача издавать морской астрономический ежегодник, улучшать астрономические и геодезические таблицы, совершенствовать навигационные приборы и проводить специальные курсы для астрономов, моряков, геодезистов. В этой работе Лаплас принимал самое деятельное участие.

* * *

Во Франции, как и в других странах, существовала своя, исторически сложившаяся, достаточно сложная и неудобная система мер и весов, к тому же не унифицированная — в одних областях государства охотнее пользовались одними мерами, в других — другими. Соотношения между мерами были сложными, пересчет из одних единиц в другие — труден; этим часто злоупотребляли недобросовестные люди. То же, в той или иной степени, относилось и к денежной системе. Надежных эталонов мер и весов не существовало. По настоятельным просьбам представителей третьего сословия Учредительное собрание создало Комиссию мер и весов и поставило перед ней задачу — выработать единообразную и рациональную систему единиц мер и весов. Работа по установлению новой метрической (десятичной) системы мер и весов под руководством Лапласа, бывшего ее неутомимым пропагандистом, была закончена в 1799 г. Метрическая система мер, принятая впервые во Франции, как и предсказывали ее создатели, в дальнейшем распространилась по всему миру; в большинстве государств она принята официально, но и там, где сохранилась своя, архаическая система мер, наряду с нею используется и метрическая.

В качестве единиц длины и веса были приняты естественные величины, которые, по мысли создателей системы, всегда могут быть найдены в случае, если эталоны будут по тем или иным причинам утрачены или испорчены. Единицей длины стал метр — одна десятимиллионная доля четверти Парижского меридиана, а единицей веса стал грамм — вес кубического сантиметра дистиллированной воды в пустоте при 4° тепла по стоградусной шкале. Весьма тщательно были изготовлены металлические эталоны метра и килограмма. Тогда же стала десятичной и французская денежная система. Франк весил 5 граммов и мог быть использован при взвешиваниях.

* * *

Когда генерал Бонапарт, вернувшись в Париж после победоносной Египетской кампании, произвел государственный переворот (18 брюмера — 9 ноября 1799 г.) и стал консулом, он на другой же день сделал Лапласа министром внутренних дел.

Бонапарт был членом Института Франции по секции механики; он интересовался математикой, занимался астрономией (под руководством Лаланда), написал статью по баллистике; он был атеистом, увлекался сочинениями Руссо. В Институте многие считали молодого генерала «своим» человеком. Лапласа он знал еще с тех времен, когда учился в военной школе, где Лаплас был экзаменатором. Бонапарту было важно заручиться поддержкой ученых института, чье влияние во Франции было в то время весьма велико. Наконец, он, по-видимому, верил в трезвый практический ум Лапласа.

Первое, что сделал Лаплас, став министром, — в тот же вечер испросил пенсию вдове своего друга Байи, астронома и бывшего мэра Парижа, казненного якобинцами.

На министерском посту Лаплас продержался недолго. Через полтора месяца Бонапарт передал эту должность своему брату Люсьену, а много лет спустя, в своих мемуарах, продиктованных в изгнании, на острове св. Елены, дал язвительную оценку деятельности Лапласа в роли министра: «Первоклассный геометр, Лаплас вскоре заявил себя администратором совершенно посредственным; первые его шаги на этом поприще убедили нас, что мы в нем обманулись. Замечательно, что ни один из вопросов практической жизни не представлялся Лапласу в его истинном свете. Он везде искал чего-то, идеи его отличались загадочностью и, наконец, он был насквозь проникнут духом бесконечно малых, который вносил даже в администрирование».*

В 1799 г. неудача Лапласа на министерском посту была компенсирована избранием его сенатором, затем вице-президентом и президентом Сената. Он стал богатым человеком. Император Наполеон сделал его графом империи и кавалером высших орденов. Лаплас заседал в Сенате и посвящал свои книги Наполеону — сначала первому консулу, потом императору. Все это не помешало ему в 1814 г., проголосовать за отречение Наполеона, когда войска союзников подошли к Парижу и Наполеон потерял свое могущество. Лаплас не явился в Париж и в период «ста дней» в 1815 г., когда Наполеон на короткое время вернул себе власть. Может быть, этими обстоятельствами отчасти объясняется нелестный отзыв Наполеона о Лапласе.

Лаплас жил тогда в Аркёйле (Arcueil) под Парижем, в собственном доме, находящемся рядом с домом его друга и коллеги по институту известного химика Бертолле. Вокруг Лапласа и Бертолле группировались молодые ученые, многие из которых потом стали знаменитыми: Био, Араго, Гей-Люссак, Пуассон, Кювье, Малю и другие. Было организовано «Аркёйльское научное общество», выпустившее несколько томов научных трудов. Тесное общение ученых разных направлений оказалось плодотворным. Впоследствии члены «Аркёйльского общества» не раз вспоминали удивительную физическую интуицию Лапласа, его умение выбрать математические методы для решения той или иной задачи, мощь его анализа. И сам Лаплас увлекся физическими проблемами и

* *Фесенков В. Г.* Лаплас. М.—Л. Госиздат, 1925, с. 24.




**Пьер Симон Лаплас.**

Бронзовая памятная медаль, гравированная Коши (Архив Парижской обсерватории).

подверг математическому анализу явления капиллярности, преломления света (в том числе двойного лучепреломления в кристаллах) и движения звука в воздушной среде.

Став сановником, Лаплас продолжал много работать. Один за другим выходят тома его «Трактата о небесной механике». В 1812 г. выходит в свет «Аналитическая теория вероятностей», переизданная через два года с предисловием «Опыт философии теории вероятностей». Это предисловие потом не раз переиздавалось отдельно.* В эти годы Лаплас

* Имеется русский перевод: *Лаплас П. С.* Опыт философии теории вероятностей. М., 1908.

становится членом большинства иностранных академий. Его труды, собранные воедино в «Небесной механике» и «Теории вероятностей», убедили ученый мир в величии таланта их автора.

После реставрации Бурбонов Лаплас был осыпан милостями. Это была дань его научной славе и награда за политическое благоразумие. Современники Лапласа шутили: «Хотя голова его обращена к звездам, ноги твердо стоят на земле». Он был пожалован титулом маркиза, званием пэра Франции и орденом Почетного легиона высшей степени (Grand-croix). Его назначили президентом Бюро долгот и председателем комиссии по реорганизации Политехнической школы. «Разряды» Института Франции снова стали, как до революции, называться академиями, и Лаплас занял видное место в Академии наук. В 1816 г. он был избран членом Французской Академии за литературные достоинства «Изложения системы мира»; такой чести удостаивались лишь очень немногие ученые-естественники.

Лаплас скончался в 1827 г. в возрасте 78 лет. В предсмертном бреду он говорил об исследованиях, которые нужно провести, и опытах, которые необходимо поставить. Его последними словами были: «То, что мы знаем — немного; то, чего же не знаем, — огромно».

* * *

Интерес к научному наследию Лапласа был велик, и вскоре после его смерти возникла необходимость в новом издании его трудов. Вдова и сын Лапласа собирались продать нормандское имение, чтобы переиздать его произведения. Но министр народного просвещения внес в Палату депутатов предложения издать труды Лапласа за счет государства. По докладу Араго Палата приняла законопроект, а король Луи-Филипп издал соответствующий закон,* текст которого гласит следующее:

### Закон

во дворце Нёйли 15 июня 1842 года

Луи-Филипп, король Франции всем сущим и будущим шлет привет. Мы предложили, палаты пэров и депутатов приняли, мы приказали и приказываем следующее:

### Статья первая

Статс-секретарю, министру народного просвещения открыть для использования в 1842 г. специальный и экстраординарный кредит в сорок тысяч франков для переиздания научных трудов Лапласа, члена Института.

---

* *Laplace P. S.* Traité de mécanique céleste. Œuvres complètes de Laplace. T. 1. Paris, Imprimérie royale, 1843, p. 1.

Статья вторая

Один экземпляр нового издания «Небесной механики», «Изложения системы мира» и «Аналитической теории веростностей» будет направлен в главный город каждого департамента, во все города, имеющие публичные библиотеки, и в специальные школы.

Статья третья

Часть кредита в сорок тысяч франков, которая не сможет быть использована в отчетном 1842 году, будет перенесена в бюджет следующего года. Сумма для расходов, разрешенных настоящим законом, будет выделена из ресурсов, предназначенных для бюджета 1842 г. законом от 25 июня 1841 г.

Настоящий закон, обсужденный, обдуманный и принятый палатой пэров и палатой депутатов и санкционированный сегодня нами, будет выполняться как закон Государства.

Предписываем нашему двору и трибуналам, префектам, административным учреждениям и всем другим, чтобы они хранили и поддерживали статьи этого закона и заставляли хранить, соблюдать и поддерживать их и, чтобы сделать их общеизвестными, опубликовали бы их и регистрировали везде, где в этом будет необходимость.

А чтобы это было непоколебимо и неизменно, мы и приказали поставить нашу печать.

Дано в Нёйли, 15 июня 1842 г.

Подписано: Луи-Филипп.

По приказу короля

статс-секретарь, министр народного просвещения, магистр университета:

Подписано: Вилльемэн (Villemin)

Большая печать.

В семитомное издание 1842 г. вошли только «итоговые» произведения Лапласа: «Трактат о небесной механике» (т. I—V), «Изложение системы мира» (т. VI) и «Аналитическая теория вероятностей» (т. VII). В 1878—1912 гг. было предпринято новое издание трудов Лапласа, на этот раз полное, в 14 томах, куда, кроме книг, ставших классическими, вошли его статьи, опубликованные в научных изданиях.

* * *

Лаплас был оптимистом в своем мировоззрении и в научных трудах. Он доказал, что солнечная система устойчива и никогда не распадется, что Луна не упадет на Землю, а Юпитер — на Солнце. Из его расчетов следовало, что Земля не остынет в недалеком будущем, как того опасались многие, и что Северный полюс не переместится в Европу. Его взгляды на будущее человечества были также оптимистичны: он выра-

жал уверенность в могуществе человеческого разума и в том, что просвещение, распространяясь все шире и шире, когда-нибудь восторжествует не только над невежеством и заблуждениями, но и над национальной розню.

Непрерывные и блистательные успехи небесной механики привели многих ученых XVIII в., в том числе и Лапласа, к убеждению, что небесная механика с ее простыми и ясными построениями, имеющими столько подтверждений и выводов, есть как бы заключительная стадия естествознания. Для Лапласа астрономия была решением огромной механической задачи, где элементы небесных движений являются произвольными постоянными; все движения небесных тел подчинены системе дифференциальных уравнений; если правильно проинтегрировать эти уравнения, точно определив произвольные постоянные, можно получить полную картину движения всех небесных тел в прошлом и будущем.

Преодолев значительные математические трудности, Лапласу удалось доказать, что те «неправильности» движений планет, которые считались несовместимыми с законами тяготения, оказались вытекающими из этих законов. «Такова судьба этого блестящего открытия, т. е. законов Ньютона, что всякое затруднение, которое тут возникало, превращалось в его торжество, и это является вернейшим доказательством его соответствия действительности»,* — писал Лаплас. Он неоднократно повторял ту мысль, что, несмотря на все трудности, человеческий разум побеждает. Здесь Лаплас, мыслитель XVIII в., верен своим учителям — Вольтеру и другим энциклопедистам, которые считали, что человеческий ум отягощен и связан предрассудками, но когда ему удастся рассеять этот туман, когда он «поднимется» до простой и рациональной картины, он победит; единственная цель науки — искать эту рациональную простоту. Они предполагали, что вся физика сведется к решению механических задач, что все разнообразие явлений можно уложить в систему уравнений, охватывающих движения всех частиц. В этом заключалась программа механистической физики. В первой половине XIX столетия подобные иллюзии разделяли многие. Слишком грандиозно было создание Ньютона и его последователей, чтобы не отозваться в других областях человеческих знаний, не отразиться на общем мировоззрении. Подобные мысли и настроения вдохновляли Лапласа — автора «Аналитической теории вероятностей». Он писал: «Современные события имеют с событиями предшествовавшими связь, основанную на очевидном принципе, что никакой предмет не может начать быть без причины, которая его произвела... Воля, сколь угодно свободная, не может без определенного мотива породить действия, даже такие, которые считаются нейтральными... Мы должны рассматривать современное состояние вселенной как результат ее предшествовавшего состояния и причину последующего. Разум, который для какого-нибудь данного момента знал бы все силы, действующие в природе, и относительное расположение ее составных частей, если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подверг-

* См. наст. изд., с. 147.

нуть эти данные анализу, обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во вселенной и самого легкого атома; для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами... Кривая, описываемая молекулой воздуха или пара, управляется столь же строго и определенно, как и планетные орбиты: между ними лишь та разница, что налагается нашим неведением».

Детерминизм Лапласа вошел в поговорку. «Лапласовский ум» как идеал аналитического ума стал понятием нарицательным.

* * *

Труды Лапласа по теории вероятностей были, как он писал, развитием двух теорий, опубликованных им в молодости в сообщениях Академии наук: «Теории производящих функций» и «Теории приближенных формул для функций больших чисел». Лаплас пересмотрел многое из того, что было сделано его предшественниками, работавшими в этой области математики: сделал более простыми и ясными доказательства в ряде теорем, уточнил их или сделал более общими другие теоремы. Особенно много нового внес Лаплас в теорию ошибок.

Лаплас широко применял методы теории вероятностей в своих научных трудах. Примером тому может служить его работа о морских приливах, в которой каждую среднюю величину пришлось подвергать особенно тщательной вероятностной оценке, так как на высоту приливов очень сильно влияют подобные факторы, не поддающиеся количественной оценке, т. е. случайные. Он писал: «... эта теория заслуживает внимания философов, показывая, как в конце концов устанавливается закономерность даже в тех вещах, которые кажутся нам обязанными случаю, причем обнаруживаются скрытые, но постоянные причины, от которых зависит эта закономерность. Именно на закономерности средних результатов, выступающей при большом числе событий, основаны различные предприятия, такие как пожизненная рента, пенсии, страхование и близкие к нему вопросы, а также оспопрививание и голосование на выборных собраниях. Все они не представляют никаких трудностей для их объяснения, если следовать моей теории».*

* * *

Нигде в своих сочинениях Лаплас не упоминает о боге или духе. Его научные представления насквозь материалистичны. В «Изложении системы мира» он не забыл рассказать об осуждении Галилея судом инквизиции, а коснувшись попыток Лейбница и Д. Бернулли математи-

* *Laplace P. S.* Théorie des probabilités. Œuvres complètes. T. 7. Paris, Imprimérie royale, 1847, p. VI.

чески обосновать акт творения мира, Лаплас замечает: «Я упоминаю об этом только для того, чтобы показать, до какой степени предрассудки, воспринятые в детстве, могут вводить в заблуждение самых великих людей».

Хорошо известен следующий рассказ о Лапласе. Получив от Лапласа экземпляр «Изложения системы мира», Наполеон как-то сказал ему: «Ньютон в своей книге говорил о боге, в Вашей же книге я не встретил имени бога ни разу». Лаплас ответил: «Гражданин первый консул, в этой гипотезе я не нуждался».

* * *

Лапласу принадлежит гипотеза о происхождении солнечной системы. По-видимому, он не придавал ей особенно большого значения; она была опубликована в качестве последнего, седьмого примечания к «Изложению системы мира». Как и Ньютон, Лаплас остерегался гипотез и не раз высказывал мысль, что следует относиться с недоверием к тому, что не является результатом наблюдения и вычисления. Нет необходимости пересказывать здесь эту гипотезу — она изложена Лапласом кратко и ясно. Идея о происхождении солнечной системы из вращающейся раскаленной туманности, постепенно сжимающейся под действием сил тяготения, получила всеобщее признание современников. С минимальным количеством допущений Лаплас объяснил все особенности строения солнечной системы в соответствии с тогдашним уровнем знаний о ней и вселенной в целом. Около ста лет гипотеза Лапласа господствовала в космогонии под названием «небулярной гипотезы Канта—Лапласа», поскольку сходные мысли высказывались ранее И. Кантом.*

Трудно переоценить значение «небулярной гипотезы» для научного мировоззрения людей XIX в. Энгельс писал: «В 1755 г. появилась „Всеобщая естественная история и теория неба“ *Канта*. Вопрос о первом толчке был устранен; Земля и вся солнечная система предстали как нечто *ставшее* во времени... Если Земля была чем-то ставшим, то чем-то ставшим должны были быть также ее теперешнее геологическое, географическое, климатическое состояние, ее растения и животные, и она должна была иметь историю не только в пространстве..., но и во времени... Сочинение Канта оставалось без непосредственного результата до тех пор, пока, долгие годы спустя, Лаплас и Гершель не развили его содержание и не обосновали его детальнее, подготовив таким образом постепенно признание „небулярной гипотезе“».**

---

* Книга, в которой Кант изложил свою космогонию, выпущенная анонимно, в научный обиход не вошла и осталась неизвестной Лапласу. Из своих предшественников Лаплас упомянул только Бюффона, автора, по-видимому, первой материалистической и эволюционной гипотезы о происхождении солнечной системы. Сочинение Бюффона было опубликовано в 1745 г. Бюффона заставили отречься от своей гипотезы.

** *Маркс К.* и *Энгельс Ф.* Соч., т. 20. М., 1961, с. 350, 351.

Мы видим, что идея эволюции солнечной системы зародилась примерно тогда же, когда и идея эволюции животного и растительного мира (Ж. Бюффон, К. Вольф). Различные положения гипотезы Канта—Лапласа в разное время подвергались критике. Предпринимались и многочисленные попытки «спасти» ее, видоизменив в некоторых деталях. Элементы лапласовской гипотезы сохранились и во многих современных гипотезах о происхождении солнечной системы.

* * *

Лаплас был великим продолжателем идей Ньютона. Ему довелось завершить решение многих важных проблем небесной механики. «Если бы можно было завершить науку о небе, — писал о Лапласе Фурье, — он бы ее завершил».* Но завершить астрономию невозможно, и у Лапласа были достойные продолжатели.

Одним из наиболее ярких триумфов послелапласовской астрономии было открытие Галле в 1846 г. планеты Нептун. Леверрье и, независимо от него, Адамс рассчитали, где следует искать это небесное тело, возмущающее движение Урана.

Уже в XX в., 13 марта 1930 г., К. Томбо таким же методом по вычислениям П. Ловелла обнаружил Плутона — наиболее удаленную из известных в настоящее время планет.

На методах классической небесной механики, разработанных Лагранжем и Лапласом, были основаны знаменитые таблицы движения планет, вычисленные Леверрье в середине прошлого столетия. В ряде случаев этими методами, частично усовершенствованными, астрономы пользуются и теперь.

Вопросами устойчивости солнечной системы занимались также многие ученые. Пуассон и Пуанкаре подтвердили выводы Лапласа о том, что солнечная система устойчива; во всяком случае надолго.

Леверрье и Ньюкомб доказали, что движение Меркурия не полностью подчиняется законам небесной механики: в движении его перигелия имеется избыток, не объяснимый возмущениями со стороны других планет. Но по теории относительности Эйнштейна так оно и должно быть. Явление, необъяснимое с точки зрения классической механики, стало одним из доказательств справедливости теории относительности. Так классическая небесная механика передала эстафету науке XX в.

В наше время космонавтики, телевидения и радио, мало кто не слышал о существовании во Вселенной так называемых черных дыр. Ни Ньютон, открывший законы всемирного тяготения, ни Лаплас, конечно, не имели о них никакого представления. Однако Лаплас, рассматривая действие притяжения очень больших масс, заинтересовался вопросом о том, какова должна быть масса звезды, притяжение которой не позволит ни одному лучу света от нее оторваться, или, в современ-

* *Fourier J. B. J.* Eloge historique de Laplace. Paris, 1829.

ных терминах, — каковы должны быть масса и плотность звезды, чтобы вторая космическая скорость для нее была больше скорости света? В результате своих вычислений, Лаплас пришел к выводу: «Светящаяся звезда с плотностью, равной плотности Земли, и диаметром в 250 раз больше диаметра Солнца, не даст ни одному световому лучу достичь нас из-за своего тяготения; поэтому возможно, что самые яркие небесные тела во Вселенной оказываются по этой причине невидимыми».* Этот вывод делает честь гениальности Лапласа и прекрасно характеризует его удивительную проницательность.

* Газ. «Ленингр. правда», 1980, 21 декабря.

## АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ И ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТ ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

На основании рекомендаций, представленных Комиссией 4 Международного астрономического союза (МАС) XVI и XVII Генеральным ассамблеям МАС (август 1976 г., Гренобль, Франция; август 1979 г., Монреаль, Канада), для практического использования во всех астрономических исследованиях начиная с 1984 г. предложена следующая новая система постоянных.

### Система астрономических постоянных МАС (1976, 1979 гг.)

#### Единицы

Единицами длины, массы и времени в международной системе единиц СИ являются *метр* (м), *килограмм* (кг) и *секунда* (с).

Астрономическая единица времени есть временной интервал в одни сутки (D), содержащий 86 400 с. Интервал, содержащий 36 525 суток, есть одно Юлианское столетие.

Астрономической единицей массы является масса Солнца (S).

Астрономической единицей длины является такая длина (A), для которой гауссова гравитационная постоянная (k) принимает значение, равное 0.01720209895, если за единицы измерения выбраны астрономические единицы длины (расстояния), массы и времени. Размерность $k^2$ совпадает с размерностью гравитационной постоянной Кавендиша G, т. е. равна $L^3M^{-1}T^{-2}$.

#### Определяющие постоянные

1. Гауссова гравитационная постоянная $k = 0.01720209895$.

#### Основные постоянные

2. Скорость света $c = 299\,792\,458$ м $с^{-1}$.
3. Световой промежуток для единичного расстояния (аберрационное время) $\tau_A = 499.004782$ с.
4. Экваториальный радиус Земли $a_e = 6\,378\,140$ м.
5. Динамический коэффициент формы для Земли $J_2 = 0.00108263$.
6. Геоцентрическая гравитационная постоянная $GE = 3.986005 \times 10^{14}$ $м^3с^{-2}$.
7. Гравитационная постоянная Кавендиша $G = 6.672 \cdot 10^{-11}$ $м^3$ $кг^{-1}с^{-2}$.
8. Отношение массы Луны к массе Земли $\mu = 0.01230002 = 1/81 \cdot 30$.

9. Общая прецессия по долготе в Юлианское столетие в стандартную эпоху 2000.0 $p=5029.''0966$.

10. Наклон эклиптики к экватору в стандартную эпоху 2000.0 $\varepsilon=23°26'21.''448$.

11. Постоянная нутации в стандартную эпоху 2000.0 $N=9.''2109$.

### Производные постоянные

12. Единичное расстояние $c\tau_A = A = 1.49597870 \cdot 10^{11}$ м.
13. Параллакс Солнца $\arcsin(a_e/A) = \pi_\odot = 8.''794148$.
14. Постоянная аберрации в стандартную эпоху 2000.0 $æ=20.''49552$.
15. Сжатие Земли $\alpha = 0.00335281 = 1/298.257$.
16. Гелиоцентрическая гравитационная постоянная $A^3k^2/D^2 = GS = 1.32712438 \cdot 10^{20}$ м$^3$с$^{-2}$.
17. Отношение массы Солнца к массе Земли $(GS)/(GE) = S/E = 332946.0$.
18. Отношение массы Солнца к массе системы Земля+Луна $(S/E)/(1+\mu) = 328900.5$.
19. Масса Солнца $(GS)/G = S = 1.9891 \cdot 10^{30}$ кг.

### Обратные значения масс планет в единицах массы Солнца

20. Меркурий 6 023 600,
Венера 408 523.5,
Земля+Луна 328 900.5,
Марс 3 098 710,
Юпитер 1047.355,
Сатурн 3498.5,
Уран 22 869,
Нептун 19 314,
Плутон 3 000 000.

Таблица 1

Элементы планетных орбит. Эпоха: *JD* 2444600.5=1980, Декабрь 27.0

| Планеты | 1950.0 наклон орбиты к эклиптике | долгота узла на эклиптике | долгота перигелия | Большая полуось орбиты | Среднее угловое движение (°/сутки) | Эксцентриситет орбиты | Средняя долгота планеты в плоскости орбиты |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $i$ | $\Omega$ | $\pi$ | $a$ | $n$ | $e$ | $l$ |
| Меркурий | 7°00196 | 47.6997 | 76°7251 | 0.3870986 | 4.092341 | 0.2056249 | 272°30548 |
| Венера | 3.39390 | 76.1440 | 131.055 | 0.7233285 | 1.602143 | 0.0067988 | 215.28621 |
| Земля+Луна | 0.00402 | 174.9 | 102.0742 | 0.9999875 | 0.9856277 | 0.0166927 | 95.20319 |
| Марс | 1.84750 | 49.0772 | 335.3425 | 1.5236272 | 0.5240661 | 0.0934465 | 315.60008 |
| Юпитер | 1.30687 | 99.9978 | 14.3057 | 5.204847 | 0.08304229 | 0.0477601 | 176.73128 |
| Сатурн | 2.48817 | 113.1588 | 95.0297 | 9.576070 | 0.03326482 | 0.0545662 | 176.76104 |
| Уран | 0.77120 | 73.8637 | 173.5594 | 19.27782 | 0.01164466 | 0.0505097 | 230.87774 |
| Нептун | 1.77602 | 131.1810 | 52.443 | 30.13366 | 0.005958508 | 0.0054711 | 262.34136 |
| Плутон | 17.13868 | 109.5791 | 222.6716 | 39.87437 | 0.003914388 | 0.2557291 | 210.53733 |

Таблица 2

**Элементы орбит спутников планет. Эпоха: *JD* 2444600.5=1980, Декабрь 27.0**

| Планета | Спутники | Сидерический период обращения (1) | Максимальная элонгация на среднем противостоянии | Большая полуось орбиты | Эксцентриситет орбиты | Наклон орбиты к экватору центральной планеты | Движение узла по фундаментальной плоскости (°/год) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $P$ | $D^\circ_{макс}$ | $a \cdot 10^{-3}$ км | $e$ | $i^0$ | ☊ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Земля | Луна | 27.321661 | — | 384.400 | 0.054900489 | 18.28÷÷28.58 | 19.34 |
| Марс | I Фобос | 0.31891023 | 25″ | 9.378 | 0.015 | 1.0 | 158.8 |
| | II Деймос | 1.2624407 | 10′2″ | 23.459 | 0.0005 | 0.9÷2.7 | 6.614 |
| Юпитер | I Ио | 1.769137786 | 2 18″ | 322 | 0.004 | 0.04 | 7.4 |
| | II Европа | 3.55118104 | 3 40 | 671 | 0.009 | 0.47 | 30 |
| | III Ганимед | 7.15455296 | 5 51 | 1070 | 0.002 | 0.21 | 137 |
| | IV Каллисто | 16.6890184 | 10 18 | 1883Б | 0.007 | 0.51 | 560 |
| | V Амальтея | 0.49817905 | 59 | 181 | 0.003 | 0.40 | 914.6 |
| | VI Гималия | 250.5662 | 1°02 46″ | 11480 | 0.15798 | 27.63 | |
| | VII Элара | 259.6528 | 1 04 11 | 11740 | 0.20719 | 24.77 | |
| Юпитер | VIII Пасифая | 735 (*R*) | 2 08′26 | 23500 | 0.378 | 145 | |
| | IX Синопе | 758 (*R*) | 2 09 31 | 23700 | 0.275 | 153 | |
| | X Лисифея | 253 | 1 04 50 | 11860 | 0.13029 | 29.02 | |
| | XI Карме | 692 (*R*) | 2 03 31 | 22600 | 0.20678 | 164 | |
| | XII Ананке | 631 (*R*) | 1 55 52 | 21200 | 0.16870 | 147 | |
| | XIII Леда | 238.72 | 1 00 39 | 11094 | 0.14672 | 26.70 | |
| Сатурн (3) | I Мимас | 0.942421813 | 30 | 182.52 | 0.0202 | 1.53 | 365.0 |
| | II Энцелад | 1.370217855 | 38 | 238.02 | 0.00452 | 0.00 | 156.2 (2) |
| | III Тефида | 1.887802160 | 48 | 294.66 | 0.00000 | 1.86 | 72.25 |
| | IV Диона | 2.736914742 | 1′01 | 377.40 | 0.002230 | 0.02 | 30.85 (2) |
| | V Рея | 4.517500436 | 1 25 | 527.04 | 0.00100 | 0.35 | 10.16 |
| | VI Титан | 15.94542068 | 3 17 | 1221.83 | 0.029192 | 0.33 | 0.5213 (2) |
| | VII Гиперион | 21.2766088 | 3 59 | 1481.1 | 0.104 | 0.43 | |
| | VIII Япет | 79.3301825 | 9 35 | 3561.3 | 0.02828 | 14.72 | |
| | IX Феба | 550.48 (*R*) | 34′51 | 12951 | 0.16326 | 177 (4) | |
| Сатурн | X Янус | 0.75 | 26 | 159 | | | |
| Уран | I Ариэль | 2.52037932 | 14″ | 190.81 | 0.0033 | 0 | 17° |
| | II Умбриэль | 4.1441765 | 20 | 265.83 | 0.0011 | 0 | |
| | III Титания | 8.7058703 | 33 | 436.05 | 0.0018 | 0 | |
| | IV Оберон | 13.4632423 | 44 | 583.08 | 0.0006 | 0 | |
| | V Миранда | 1.4134840 | 10 | 129.79 | <0.01 | | |
| Нептун | I Тритон | 5.8768441 (*R*) | 17″ | 355.25 | <0.01 | 160° | 61° |
| | II Нереида | 359.881 | 4′21 | 5512 | 0.7483 | 27.6 (5) | |
| Плутон | I Харон | 6.3867 (?) | < 1″ | 17 | | | |

Примечания.
(1) Для спутников Сатурна — тропический период.
(2) Скорость увеличения долготы линии апсид.
(3) За последнее время с помощью космических кораблей открыто еще 6 спутников Сатурна, элементами орбит которых мы не располагаем (прим. перев.).
(4) Относительно эклиптики.
(5) Относительно экватора эпохи 1950.0.

## КАНТ О ПЕРЕМЕННОСТИ СУТОЧНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В 1752 г. Берлинская Академия наук объявила премию за решение задачи, связанной с вопросами, претерпела ли Земля с первых моментов своего возникновения некое изменение в своем вращении вокруг оси, вызывающем смену дня и ночи, какова тому изменению причина и как можно его обнаружить. Тема конкурса была опубликована в нескольких научных журналах и известных газетах. Объявление о конкурсе было известно и Канту, который оставил в это время должность домашнего учителя и, возвратившись в 1754 г. в Кенигсберг, вскоре начал печатание своей известной «Всеобщей естественной истории и теории неба». Исследования Канта, часть результатов которых была включена в этот труд, несомненно охватывали и работу над темой, предложенной Берлинской Академией наук. Однако Кант не послал написанное им рассуждение на эту тему в Академию, а опубликовал его в 1754 г. в виде наброска ответа на вопрос, заданный Академией наук в Берлине. В нем Кант прямо указывает на существование внешней причины, постепенно уменьшающей вращение Земли и стремящейся свести его на нет в течение неизмеримо долгого времени, причем впервые в истории науки Кант связывает эту причину с притяжениями Луны и Солнца, под влиянием которых воды океанов, покрывающие Землю, по крайней мере, на одну треть, пребывают в непрестанном движении, направленном в сторону, противоположную суточному вращению. Кант объясняет далее, что притяжение Луны, составляющее бóльшую часть этого влияния, создает в водах океанов большую волну, из-за которой они стремятся стечь в точки, лежащие под Луной как с ближайшей к ней стороны, так и с противоположной, одновременно подымаясь. А так как эти точки подъема океанских вод перемещаются с востока на запад, то они сообщают мировому океану постоянное течение во всем его объеме именно в этом направлении. Поскольку это течение направлено против вращения Земли, то оно, по мнению Канта, и является причиной непрерывного увеличения периода осевого вращения Земли. Приливы как причины течения в океане в восточно-западном направлении и его воздействия на берега Кант подробно изучал по обширному труду Бюффона «Всеобщая история природы». Прежде чем взяться за числовые оценки этого эффекта, Кант замечает, что для философа было бы непростительным промахом считать малое влияние недостойным внимания, тогда как оно, постоянно накапливаясь, может исчерпать сколь угодно большое количество. Кант находит, что для уничтожения суточного вращения Земли потребовалось бы 2 млн. лет, если предположить скорость морского течения неизменной и плотности Земли и океанских вод одинаковыми. На этой основе Кант заключает, что в течение умеренных периодов, когда это замедление еще не достигло зна-

чительной величины, например по истечению 2 тыс. лет, продолжительность года должна уменьшиться на $8^1/_2$ ч. Кант высказал идеи, связанные с более быстрым осевым вращением Луны в прошлом и с будущей историей Земли, сделав вывод о том, что Луна представляет более молодое небесное тело, ставшее спутником Земли, когда последняя уже перешла из жидкого состояния в твердое: в противном случае Землю постигла бы та же участь, что и Луну (т. е. равенство периодов осевого вращения и орбитального обращения), из-за притяжения Луны. Особое внимание привлекает к себе идея Канта о замедлении вращения Луны, находившейся в жидком состоянии, из-за приливного трения. К проблеме связанного вращения Луны Кант возвратился намного позже под влиянием работы Шрётера.

Проблемами вращения Земли Кант, по-видимому, занимался еще в середине 70-х годов. Об этом свидетельствует так называемый разрозненный листок, входивший в рукопись «Размышления о физической географии». Рассматривая теорию Эйлера, связанную с постепенным уменьшением длины года, не подтвержденную, однако, наблюдениями, Кант указывает на предположение Эйлера о возможном одновременном уменьшении скорости осевого вращения Земли по неизвестной причине. Кант упоминает в качестве такой причины процесс постепенного уплотнения Земли: ее частицы все более сближаются, радиус уменьшается. Кант замечает, что уменьшение диаметра Земли на одну миллионную часть через год способно изменить продолжительность суток на полминуты. Этого более чем достаточно, чтобы за несколько столетий обнаружить изменение меры длины года. Наряду со сжатием земли Кант считает ускоряющим фактором также смещение более тяжелых масс внутри Земли к центру. К сожалению, из весьма кратких заметок Канта нельзя узнать, придерживался ли он в это время своей прежней точки зрения на причину замедления земного вращения. Очевидно лишь то, что его работы не были известны, и в 1783 г. та же конкурсная тема была предложена Петербургской Академией наук; премии были присуждены Геннерту и Фризи, причем последний был уже лауреатом премии Берлинской Академии наук 1756 г. Реакция Канта на обе премированные работы, отстаивавшие равномерность суточного вращения Земли, не известна. Лишь в XIX в. вновь был поставлен вопрос о последствиях приливного трения.

## ЛИТЕРАТУРА

### Труды Лапласа

Exposition du système du Monde. Ed. 1—5, Paris, 1796—1824; ed. 6. Paris, 1835; Ed. 7. Bruxelles, 1827; Ed. 8. Paris, 1849; Ed. 9. Paris, 1846.
Traité de mécanique céleste. T. 1—2. Paris, 1798—1799; t. 3, 1803; t. 4, 1805; t. 5, 1825; t. 1—5, 1842.
Théorie analytique des probabilités. Paris, ed. 1, 1812; ed. 2, 1814; ed. 3, 1820; ed. 4, 1842.
Oeuvres complètes de Laplace. Traité de mécanique céleste. T. 1—5. Paris, Gauthier-Villars, 1878—1904.
Exposition du système du Monde. T. 6. Paris, Gauthier-Villars, 1884.
Théorie des probabilités. T. 7. Paris, Gauthier-Villars, 1886.
Mémoires extraits des Recueils de l'Académie des Sciences. T. 7—12. Paris, Gauthier-Villars, 1891—1898.
Mémoires extraits de la Connaissance des Temps. T. 13. Paris, Gauthier-Villars, 1904.
Correspondance et Mémoires divers. Tables générales. T. 14. Paris, Gauthier-Villars, 1912.

### Труды Лапласа, переведенные на другие языки

*Лаплас П. С.* Изложение системы мира. Т. 1—2. СПб., 1861.
*Лаплас П. С.* Опыт философии теории вероятностей. М., 1908.
*Laplace P. S.* Mechanik des Himmels. Berlin, 1800—1802.
*Laplace P. S.* Philosophischer Versuch über Wahrscheinlichkeiten. Heidelberg, 1819.
*Laplace P. S.* Treatise of Celestial Mechanics. Boston, 1829—1839.

### О Лапласе и его трудах

*Андроновы А. и Е.* Лаплас. М., 1930.
*Воронцов-Вельяминов Б.* Лаплас. М., 1937.
*Идельсон Н. И.* Три годовщины. — Русский астрон. календарь. Нижний Новгород, 1927.
*Фесенков В. Г.* Лаплас. М.—Л., 1925.
*Andoyer H.* L'Œuvre scientifique de Laplace. Paris, 1922.
*Arago F. D.* Notices scientifique. Paris, 1843.
*Bauer E.* Laplace et la physique. Études d'Astron., 1950.
*Biot J. B.* Une anecdote relative à M. Laplace. — J. savants, 1850, février.
*Danjon A.* Pierre-Simon Laplace. Etudes d'Astron., 1950.
*Darmois G.* Laplace, probabiliste et statisticien. Etudes d'Astron., 1950.
*Daru.* Discours de M. le comte Daru, prononcé aux funerailles de M. marquis de Laplace, le 7 mars 1827. Inst. Royal de France, Acad. française. Paris, 1827.
*Fourier J. B. J.* Éloge historique de M. marquis de Laplace. Paris, 1829.
*Lemaitre G.* Laplace et la Mécanique céleste. Études d'Astron., 1950.
*Poisson S. D.* Discours de M. Poisson, prononcé aux funerailles de M. le marquis de Laplace. Inst. Royal de France, Acad. Royal des Sciences. Paris, 1827.
*Poincaré H.* Leçons sur les Hypothèses cosmogoniques. Paris, 1911.

**Пьер Симон Лаплас**

ИЗЛОЖЕНИЕ СИСТЕМЫ МИРА

Утверждено к печати
Редакционной коллегией серии «Классики науки»

Редактор издательства *Т. И. Сушкова*
Художник *Д. С. Данилов*
Технический редактор *Г. А. Бессонова*
Корректоры *Е. А. Гинстлинг, Л. Я. Комм*
и *Л. А. Привалова*

ИБ № 8648

Сдано в набор 16.02.82. Подписано к печати 31.05.82. М-26495. Формат $70 \times 90^1/_{16}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Печ. л. $23^1/_2$+ +1 вкл. ($^1/_8$ печ. л.). Усл. печ. л. 27.63. Усл. кр.-отт. 28.95. Уч.-изд. л. 28.91. Тираж 5800. Изд. № 8216. Тип. зак. № 1153. Цена 2 р. 30 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
199164, Ленинград, В-164, Менделеевская лин., 1

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая типография издательства «Наука»
199034, Ленинград, В-34, 9 линия, 12

**КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**

можно предварительно заказать
в магазинах конторы «Академкнига»
Для получения книг почтой
заказы просим направлять по адресу:

**117192 Москва, В-192, Мичуринский пр., 12**
Магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»;
**197345 Ленинград, П-345, Петрозаводская ул., 7**
Магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига»
или в ближайший магазин «Академкнига»,
имеющий отдел «Книга — почтой»;

**480091 Алма-Ата,** ул. Фурманова, 91/97 («Книга — почтой»);
**370005 Баку,** ул. Джапаридзе, 13;
**320005 Днепропетровск,** пр. Гагарина, 24 («Книга — почтой»);
**734001 Душанбе,** пр. Ленина, 95 («Книга — почтой»);
**375002 Ереван,** ул. Туманяна, 31;
**664033 Иркутск,** ул. Лермонтова, 289;
**252030 Киев,** ул. Ленина, 42;
**252030 Киев,** ул. Пирогова, 2;
**252142 Киев,** пр. Вернадского, 79;
**252030 Киев,** ул. Пирогова, 4 («Книга — почтой»);
**277012 Кишинев,** пр. Ленина, 148 («Книга — почтой»);
**343900 Краматорск** Донецкой обл., ул. Марата, 1;
**660049 Красноярск,** пр. Мира, 84;
**443002 Куйбышев,** пр. Ленина, 2 (Книга — почтой»);
**191104 Ленинград,** Литейный пр., 57;
**199164 Ленинград,** Таможенный пер., 2;
**199004 Ленинград,** 9 линия, 16;
**220012 Минск,** Ленинский пр., 72 («Книга — почтой»);
**103009 Москва,** ул. Горького, 8;
**117312 Москва,** ул. Вавилова, 55/7;
**630076 Новосибирск,** Красный пр., 51;
**630090 Новосибирск,** Академгородок, Морской пр., 22 («Книга — почтой»);
**142292 Пущино** Московской обл., МР «В», 1;
**620151 Свердловск,** ул. Мамина-Сибиряка, 137 («Книга — почтой»);
**700029 Ташкент,** ул. Ленина, 73;
**700100 Ташкент,** ул. Шота Руставели, 43;
**700187 Ташкент,** ул. Дружбы народов, 6 («Книга — почтой»);
**634050 Томск,** наб. реки Ушайки, 18;
**450059 Уфа,** ул. Р. Зорге, 10 («Книга — почтой»);
**450025 Уфа,** Коммунистическая ул., 49;
**720001 Фрунзе,** бульвар Дзержинского, 42 («Книга — почтой»);
**310078 Харьков,** ул. Чернышевского, 87 («Книга — почтой).



ПЬЕР СИМОН ЛАПЛАС

ИЗЛО-
ЖЕНИЕ
СИСТЕМЫ
МИРА

